



## レールの最近の溶接技術とその信頼性

滝 本 正\*

### Latest Welding Technology for Long Rail and Its Reliability

Tadashi TAKIMOTO

#### 1. ま え が き

ロングレールの使用は、列車走行速度の向上、乗心地の改善、軌道保守作業の軽減などに著しい効果のあることが認められており、わが国でもロングレールが多くとり入れられている。

ロングレールは、メーカーで圧延製造された定尺レール(わが国では 25 m または 50 m, 各国により異なる)を溶接し、所要長さのものとしている。

わが国で現在用いられているロングレール化のための溶接法には、フラッシュ溶接、ガス圧接、エンクローズアーク溶接、テルミット溶接の 4 種類がある。ガス圧接、エンクローズアーク溶接は、わが国以外ではほとんど用いられておらず、わが国独自の溶接法である。フラッシュ溶接、テルミット溶接は、欧米各国の鉄道で利用されている方法で、レールの溶接法として歴史のある溶接法である。

わが国におけるレール溶接は、ガス圧接が主で、56～57 年度に溶接された溶接部口数の約 50% を占めている。フラッシュ溶接、エンクローズアーク溶接はそれぞれ約 20% 程度である。

レールの溶接には、上述のレールロング化のための溶接のほか、レール頭頂面の肉盛補修溶接、在来線の高速化のため開発された分岐器の製作に利用される溶接、新幹線で利用されている高マンガン鋼製分岐器の溶接などがあるが、ここではレールロング化のための溶接にしばらく、わが国の現状を主にのべる。

#### 2. レールのロング化工法<sup>1)</sup>

ミルメーカーで製造された定尺レールをロング化するには、ロングレールの運搬、敷設等を考慮し種々の方法がとられている。現在までに、わが国で用いられた方法には、次の三つがある。

① 専用のレール溶接工場、あるいは仮設基地で定尺レールを所定本数つなぎ、200 m または 150 m にする。このレールを敷設場所に運搬後、200 m あるいは 150 m レールどうしを更に溶接し、所要長さのロングレールと

する。

② 仮設基地で定尺レールを順次溶接し、所要長さとしたのち、敷設場所に運搬する。

③ 敷設場所に定尺レールを運んだのち、順次溶接し、所要長さとする。

①の場合、200 m に溶接されたレールは、専用貨車で、敷設場所へ運搬する。現在利用している線路のレールを、ロングレールと交換する場合、最近はほとんど、この工法がとられている。また新幹線の建設や、新線建設の場合も、この工法がとられることが多い。欧米では工場内で溶接されるレールの長さは異なるが、ほとんどがこの工法である。この工法では、定尺レール、200 m レールを集積するのに、かなり広い場所が必要となる。

②の工法はわが国でロングレール化が始まった当初はよく用いられ、1500 m 以上のロングレール製造にも用いられた。最近では、線路わきに一時的に基地をもうけるための用地も少なくなり、またロング化されたレールを遠くまで運搬することも、列車密度の関係で容易でなく、利用される度合いは少なくなつた。まれに大都市近郊の電車線区間のレール交換時、信号機間の間隔に合わせた、わりと短いロングレールとする場合に利用される。

③の方法は、①、②の方法で溶接ができない場合に利用されるが、複線化線増工事等に、まれに利用される。

上記の各工法に利用される溶接法は、①の場合、工場内あるいは仮設基地では、フラッシュ溶接、ガス圧接がほとんどであり、200 m レールを更に溶接する場合は、エンクローズアーク溶接が多い。最近になり、エンクローズアーク溶接に替わつて、ガス圧接が利用されだした。

欧米では工場内がフラッシュ溶接、現場での溶接はテルミット溶接がほとんどである。

②、③の場合は、ほとんどがガス圧接であるが、エンクローズアーク溶接もまれに利用される。

レール溶接に、どの方法を用いるかは、上述の基地等設定場所の確保、ロングレール運搬の可否のほか、列車の走行する間隔(列車間合)による作業時間の制約、溶接機器の運搬、溶接方法の特性等、種々の要因を考慮の

昭和 59 年 2 月 24 日受付 (Received Feb. 24, 1984) (依頼解説)

\* 鉄道技術研究所 (Railway Technical Research Institute, Japanese National Railways, 2-8-38 Hikari-cho Kokubunji 184)

うえ、決定される。

### 3. レールの溶接法とその特徴<sup>1)~3)</sup>

#### 3.1 フラッシュ溶接

本法は接合すべき面を突き合わせ、この間に通电することにより火花（フラッシュ）を発生させ、接合面を加熱し、接合に適した温度となつた後、レール長手方向に急速に加圧（アプセット）して接合する方法である。

レール溶接の場合、接合すべき断面が大きく、その形状も複雑であるため、全断面をフラッシュのみで接合に適した温度に均一加熱することが困難であり、溶接行程中に予熱行程をもうけている。

予熱行程には、接合面を密着させて大電流を流し、抵抗発熱を利用する方式、小電流のフラッシュを連続して発生させて予熱を行う方式の二通りがある。

大電流方式は予熱時間が短く、溶接時間も短い。写真1は現在国鉄が草津レールセンターで利用している大電流予熱方式による溶接機でスイス製のものである。本機は溶接に直流を利用しており、無負荷電圧 6.3 V、溶接時間は約 120 s である。重量は約 30 t で固定型である。溶接部の性能を左右する溶接条件はプリセット式であり、レールをクランプ後は、端面を密着させるための初期フラッシュ（フラッシュイーズン）、予熱通電、フラッシュ、アプセット、フラッシュメタル除去、アソクランプまでの全行程が自動化されている。本機は国外でもレールのフラッシュ溶接機として、数多く稼働している。

小電流予熱方式は予熱フラッシュ時間がやや長いだけ、溶接時間も長く、約 180 s である。この方式はソ連パトソ溶接研究所で開発された方式である。本機はソ連では、レール溶接専用車に積載され、前述③の工法で利用されている。国鉄では、昭和 50 年開業した山陽新幹線岡山一博多間の建設時に、ソ連製を購入し、ソ連式の利用でなく、前述①方式の仮設基地溶接、ならびに 200 m レールの溶接に利用した。現在は新幹線浜松、名古屋、大阪地区で 200 m ロングにするための溶接に利用している。また上越新幹線建設では、新潟県下で、本機による溶接が一部行われた。本機も溶接条件は、プリセット方式で設定でき、溶接終了までは全自動である。

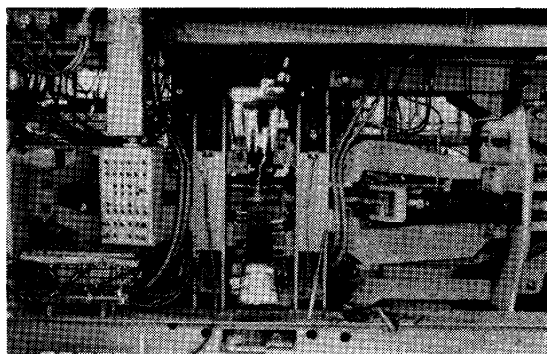


写真 1 フラッシュ溶接機

フラッシュ溶接は、フラッシュ時およびアプセット時に、レールが長手方向に移動するので、溶接されるレールの一方は可動とする必要がある。またフラッシュ代、アプセット代だけレールが短くなる。25 m レールの場合、約 40 mm 短くなる。

山陽新幹線山口県下で行われた 200 m レールの溶接では、200 m 全長にわたつてレールを可動としたが、この準備作業およびフラッシュ代+アプセット代だけレールが短くなることにより、追加作業が生じ、必ずしも効率的でないで、その後本方式は利用されていない。

フラッシュ溶接部は、溶接条件が適正であれば、得られる性能は、ほぼ母材と同等であり、レールの溶接法としては最も信頼性のある方法である。

#### 3.2 ガス圧接

本法は接合すべき端部を突き合わせて密着させ、レール軸方向に加圧しながら、ガス炎で外周から加熱し接合する方法である。レール溶接の場合は、定圧-クローズバット法と称される軸方向に終始一定の圧力を加えたまま接合する方法を用いている。加熱には酸素-アセチレン炎を利用している。

フラッシュ溶接の場合と同様、本法もレールの全断面をできるだけ均一に加熱することが必要であり、加熱用バーナーの形状、火口の配列等に特別な考慮がはらわれている。

本法は昭和 28 年にレール溶接法として、国鉄技研で開発された方法である。開発当初のガス圧接機は、重量約 3 t と大型の固定型であり、上述②方式で主に利用された。昭和 39 年開業の東海道新幹線建設では、電源不要の本法が①方式の仮設基地で、25 m レールを溶接するのに利用された<sup>4)</sup>。当時東京-新大阪間のレール溶接部約 8 万口のうち、約半数が本法で施工された<sup>5)</sup>。

昭和 50 年開業した山陽新幹線岡山以西の建設に際しては、重量約 500 kg の、より容易に可搬できる小型圧接機が開発され<sup>6)</sup>、前述のフラッシュ同様、200 m レールの溶接に利用された。次いで、この小型機に、ガス圧接部のふくらみを除去するためのトリマーを装備した、より性能のすぐれた小型圧接機が開発された。

この小型機の特徴は、軽量のほか、従来機はレールが圧接機をくぐり抜ける固定型であつたのを、レールの上方から機器をセットするよう可動型としたこと、加熱用バーナーを二つ割りにし、脱着可能にしたことなどである。本小型機の開発により、従来の圧接機では不可能であつたレール敷設現場での 200 m レールの溶接が可能となつた。またトリマーを装備させたことにより、従来のガススカーフィングによる余盛除去作業が軽減されたほか、スカーフィング技両の差による溶接部仕上げ作業の軽減、不良圧接部が存在する場合、余盛除去時のトリマーによるせん断力で、不良部が開ロシ、肉眼検査で溶接部の良、不良が判定でき、作業の後もどりがなくなつ

たなど、種々の利点が得られている。

本機は東北・上越新幹線の建設では、定尺レールを仮設基地で 200 m にする溶接や、200 m レールを更に長くする現場溶接にも利用され、現在では新線建設時のレールロング化溶接の主力として、各所で利用されている。

ガス圧接法は、フラッシュ溶接同様、レール長手方向にレールがわずかに縮小するので、レールを枕木に固定したままでは溶接不可能である。上述 200 m レールの溶接では全長を可動にする方法がとられた。フラッシュ溶接に比べると、レールの移動が一方方向で、しかも静的であること、東北・上越新幹線では枕木がスラブ枕木となつていることなどの点で、本法の利用が容易となつた。

溶接時レールが可動状態でなければならないことは、溶接直後に列車が通過する線路の溶接は無理であり、間合が十分あり、枕木などへのレール締結解放が可能なきときは、締結解放-レール可動化準備-溶接-再締結の作業量と他溶接法との比較で本法の適用が決定される。写真 2 にトリマー付小型圧接機による溶接状況を示す。

### 3.3 エンクローズアーク溶接

本法は被覆アーク溶接棒を使用する手溶接である。図 1 に示すように、レールを約 17 mm の間隔をもうけて設置し、レール足部は、第 1 層を 2 パス、第 2 層以上は 1 パス 1 層で溶接し、各層ごとスラグ除去を行う多層溶接法である。第 1 層開始前には、溶接部の急冷・硬化を

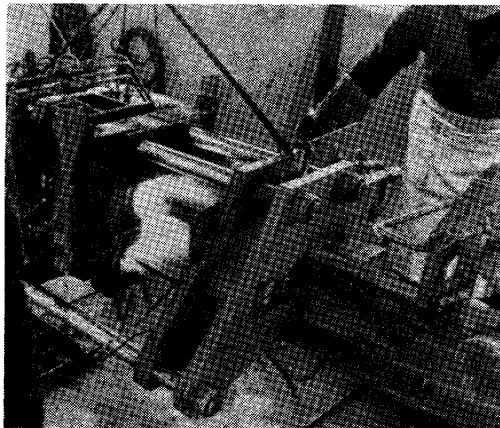


写真 2 トリマー付き小型ガス圧接機

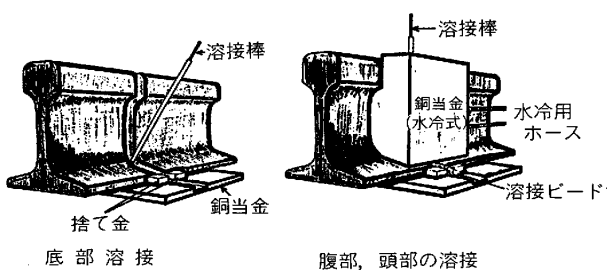


図 1 エンクローズアーク溶接要領

防ぐため、レール足部のみ約 500°C の予熱を行う。

腹部・頭部の溶接は、レール側面から水冷銅当金をあて、溶接部を囲み、上方から溶接棒を入れて溶接するエンクローズ法である。この場合、スラグ除去は行わず、溶接棒のとりかえ時のみ、アークを切る連続溶接である。

使用溶接棒はレール足部が、80 kgf/mm<sup>2</sup> 級高張力鋼用溶接棒、腹部・頭部は溶着金属の引張強さ 80 kgf/mm<sup>2</sup> 級のエンクローズアーク溶接専用の、スラグ流動性の良好な溶接棒である。本法の溶接時間は、レール足部の予熱開始から溶接終了まで約 1 h である。溶接後には、特殊な後熱処理炉を用い、応力除去処理を行つている。

レールのエンクローズアーク溶接法は、昭和 30 年代初めにベルギーでも開発され実用化された歴史がある<sup>7)</sup>が、わが国では、東海道新幹線建設にあわせ、わが国独自の方法が開発された<sup>8)</sup>。

本法は、フラッシュ溶接、ガス圧接のように、レールが縮小することがなく、枕木に固定したレールを溶接できる利点が活かされ、新幹線の建設時、前述の①工法で、200 m レールを更に溶接する場合に、後述するテルミット溶接とともに利用された。以来今日まで、200 m レールの溶接はほとんど本法によつて行われてきた。現在は、新幹線や在来線のレール交換時、200 m レールを更に長くする溶接や、ロングレールの一部を交換する際の現場溶接法として利用されている。

前述のように、東北・上越新幹線では、ガス圧接が本法に置きかわつたが、同線でも駅構内の分岐器周辺で、レールの縮小が許されない箇所や、スラブ枕木区間以外のバラスト-枕木区間で、ガス圧接の適用が容易でない区間には、本法が利用された。

フラッシュ溶接、ガス圧接は機械溶接といわれるものであり、溶接部の品質は均一なものが得られるが、本法は作業者がアーク溶接棒の運棒操作を行うので、溶接部の品質が作業者の技量に左右されることがある。溶接時間の長いことと合わせ本法の欠点といえる。

溶接時間短縮のため、レール間隔を約 12 mm とせまくし、レール足部の溶接時、スラグ除去回数減少をはかつた狭開先溶接法の開発も終えているが、作業者の技量として、更に高等なものを要するので、実用化は限られている。

エンクローズ溶接金属部には、凝固時高温割れの発生する場合があります。この欠陥が原因で、溶接部が疲労損傷する事例も出た。最近では腹部・頭部のエンクローズ専用棒として、表 1 に示す化学成分の、高温割れ発生傾向の小さいものを利用している。本溶接棒は、スラグの流動性も在来棒より改善されているので、溶接部に生じやすかつたスラグ巻き込み欠陥防止にも役立つている。

表 1 溶接金属の化学成分と機械的性質の一例

棒の種類	化学成分 (%)								機械的性質	
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	引張強さ (kgf/mm <sup>2</sup> )	伸び (%)
従来棒	0.16	0.24	1.31	0.009	0.009	1.56	0.44	0.30	84	21
改良棒	0.14	0.48	1.98	0.011	0.006	—	0.51	0.39	82	19

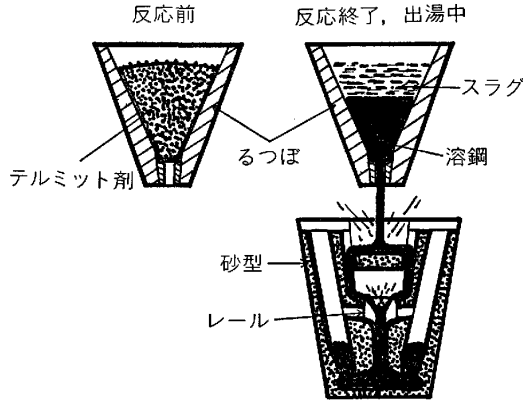


図 2 テルミット溶接要領

3.4 テルミット溶接

本法は、酸化金属とアルミニウム間の脱酸反応を利用して得た溶鋼を用いる方法である。レール溶接の場合には、エンクローズアーク溶接と同様、適当な間隔をもうけて、レールを設置し、図2に示すように珪砂を主成分とする生型もしくは乾燥型の鑄型で囲み、溶鋼を流し込み溶接する。

本法もレールを枕木に固定したまま溶接でき、海外では、溶融溶接法として盛んに利用されている。現在利用されているレールの溶接法としては最も歴史のある方法である。現在の方法は、鑄造溶接であるが、過去にはフラッシュ溶接の抵抗発熱、ガス圧接のガス炎加熱のかわりに、テルミット反応熱または反応生成物の熱を利用して、接合部を加熱し、加圧して接合する方法も用いられた<sup>9)</sup>。

テルミット溶接法は、エンクローズアーク溶接法に比べれば、溶接に要する時間が短いので、列車間合のとりにくい活線の溶接に最適である。わが国でも、ロングレール普及初期に利用されて以来、東海道新幹線の建設、在来線で用いられてきた。東海道新幹線では、エンクローズアーク溶接同様 200 m レールの現場溶接として用いられたが、その溶接部品質に問題が生じ、溶接部損傷も発生したので、以後の新幹線では、徳山地区、小倉地区の列車走行速度のゆるい区間で少数利用された以外、利用されていない。在来線でも利用される度合は少なかった。

最近、エンクローズアーク溶接では、間合の制限もあり、活線の溶接が困難になってきており、従来のテルミット法に比し、信頼性の高いと考えられる施工法により、再度利用されはじめた。

新法は必要資材を西ドイツから輸入し、図2に示したSKV法<sup>†</sup>を利用している。この方法は、溶接金属の化学成分がほぼ母材と同程度のもので得られ、硬さが母材よりやや硬くなり、経年後の溶接部局部摩耗を少なくするよう考慮されている。その他、鑄型が乾燥型のレール左右2分割であること、予熱時間が短く、かつ予熱温度が約 600°C と低いこと、反応生成する溶鋼が多く、溶接部に必要な押湯量を十分に確保できること、鑄型の通気性も良いなど、従来わが国で開発利用していた方法に比べ、作業面でも数々の特徴がある<sup>10)</sup>。

昭和 54 年に導入以来、新法により 5000 口を超す溶接が、在来線で行われているが、現在までのところ、溶接部の品質に起因する損傷事例は生じていない。

新法は溶鋼の製錬や注入時オートトップ使用のため鑄込作業に、作業者の技量が介入しない。このため、エンクローズアーク溶接のように溶接部品質が作業者の技量で左右される欠点はない。しかるるつぼ内でのテルミット反応の推移、溶鋼-スラグの分離度合、溶接部が鑄鋼品となるなどのため、品質のばらつきがやや大きい。

4. 溶接部の損傷

レールは製造時、使用条件に対し最も良好な機械的性質、その他が付与されるよう配慮されている。上述の各溶接法はいずれも溶接時、レールを局部的に高温に加熱、冷却する方法をとっている。各溶接法ごとに、その熱サイクルは異なっている。またエンクローズアーク溶接、テルミット溶接では、溶接部に溶融、凝固した溶接金属があり、化学成分も母材と異なる。このため、各溶接法により、溶接部の性質に差異が生じ、また母材とも異なつたものとなる。

一方、使用条件からは、母材と同一の条件下で使用されるため、使用状態によつては、レール溶接部も損傷されることがある。

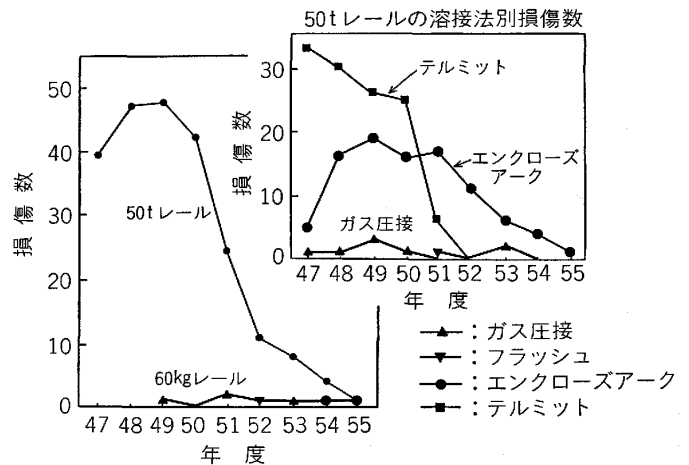


図 3 レール溶接部損傷数

† SKV法 (商品名, Thermit-Schnellschweissenverfahren mit Kurzworwärmung)

表 2 60 kg レール 投入量

年 度	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56
レール延長 (km)	12.1	84.6	94.2	150.8	222.2	254.2	278.9	302.0	300.0	294.0	102.0
累 計 (km)	12.1	108.7	190.9	341.7	563.9	818.1	1097.0	1399.0	1699.0	1993.0	2095.0

図3は昭和47年度以後における新幹線50Tレール<sup>2</sup>、60kgレールの溶接法別損傷数を示す<sup>1)</sup>。開業当時50Tレールは、ガス圧接、フラッシュ溶接、エンクローズアーク溶接、テルミット溶接の各法で溶接された<sup>4)5)8)11)</sup>。各溶接部数は、39100、16800、11400、14100、であつた<sup>9)</sup>。各溶接部に対する損傷比率は溶融溶接であるテルミット溶接、エンクローズアーク溶接が高かつた。50年以後、テルミット溶接の損傷が急激に減つたのは、テルミット溶接不良部の除去対策がとられたり、50Tレールそのものが損傷しだしたため、レール交換が行われ同溶接部が少なくなつたためである。同溶接部は52年度末でなくなつた。

60kgレールは、昭和47年に開業した新大阪—岡山間から利用され、同年から東京—新大阪でも50Tレールにかわつて使われだした。現在、60kgレールは新幹線のすべて、在来線では上級線に利用されている。

東京—新大阪間における60kg投入量を各年度別に表2に示す。東京—岡山間の60kgレールで、51年当時の50Tレールと同等の使用条件に達したレール延長は、東京—新大阪間のレール延長と同じ、約2000kmに近づいている。図3に示したように、60kgレールの損傷は、50Tレールのそれに比べ、著しく減少し溶接部の信頼性が高まつていることが認められる。特にエンクローズアーク溶接部の損傷数減少が著しい。この区間にはテルミット溶接は利用されていない。

60kgレール溶接部損傷数の減少は、50Tレール損傷原因の究明を行い、溶接欠陥の発生防止策が効をそうしたと考えられる。特に50Tレールで損傷の多かつたエンクローズアーク溶接では、頭部に存在した溶接金属の微小高温割れ、スラグ巻き込み等の欠陥防止のため、溶接条件の変更、技量管理の改善をはかつた成果と考えられる。

一方、在来線に利用されている50N<sub>1</sub>レールの昭和47~57年度におけるレール溶接部全損傷数は105件であり、溶接法別では、フラッシュ溶接15件、ガス圧接16件、エンクローズアーク溶接42件、テルミット溶接32件で、エンクローズアーク溶接、テルミット溶接が年平均約4件、約3件と高くなつている。ここでテルミット溶接は、54年より導入した新法でなく、在来から利用されていた方法によるものである。またエンクローズアーク溶接は、新幹線で60kgレールの溶接に従事した作業者とは別人によるものである。損傷溶接部は昭和50年

以前の溶接部が多く、レール頭部溶接欠陥からの疲労による損傷である点は、50Tレールと同じである。

溶接部の損傷形態としては、レール足部から疲労傷が進む事例、頭部から進む事例、腹部から進む事例があり、レールが長手方向に分断される横裂がほとんどである。図3に示した50Tレールの損傷のうち、テルミット溶接を除くほとんどが、レール頭部、レール足部からの疲労傷が進展した横裂で、腹部からの損傷は数件である<sup>12)</sup>。また60kgレールの場合も腹部からのものはフラッシュ溶接1件のみである。

溶接部が損傷する主たる原因は、存在する溶接欠陥に使用時の荷重が繰り返し作用し、欠陥部から疲労傷が進展しはじめることにある。底部に欠陥が存在する場合は、列車荷重により、欠陥部に引張力が作用することが疲労傷を進展させ、頭部に欠陥の存在する場合は、車輪の転動による力が主に疲労傷を進展させる。疲労傷が成長したのちは、ぜい性的に破断する。

写真3は在来線50Nレールエンクローズアーク溶接部頭部欠陥から進展破断した例である。レール頭頂面下約10mmの位置に溶接欠陥が存在した。

頭部から進展する場合、疲労傷がレール頭部面積の40~60%以上まで拡がつてのち破断する。また疲労傷の進展方向は、レールに直角でなく、列車進行方向に60~70度傾いている。頭部からの破断は早いもので、使用後5~6年を経て発生する。

写真4は50Nレールガス圧接部の破断例である。レール足部のこの部位で疲労傷が進展する場合は、わりと小さいうちに、使用後短期間で破断する。写真4の場合は、使用後半年であつた。

図4はレール足部の疲労傷の進展状況を疲労試験によ

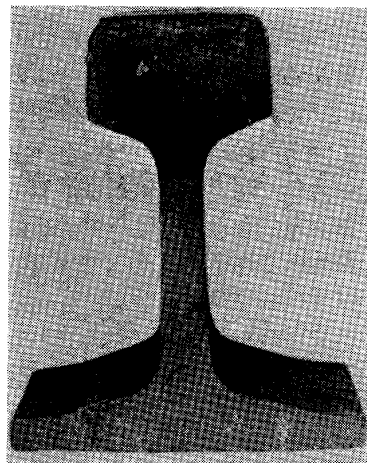


写真3 エンクローズアーク溶接部の破断面

<sup>12)</sup> 東海道新幹線開業時東京—新大阪間に投入、56年度末までにすべて60kgレールに交換され、現在は利用されていない。

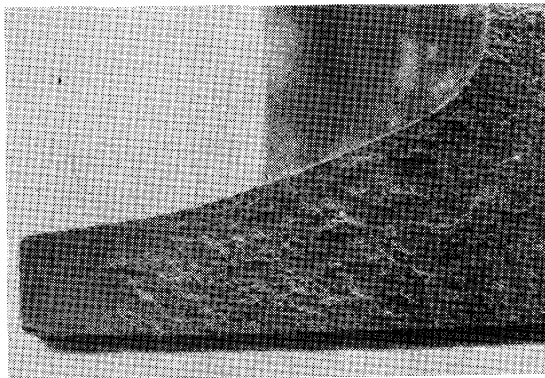


写真4 ガス圧接部の破断面

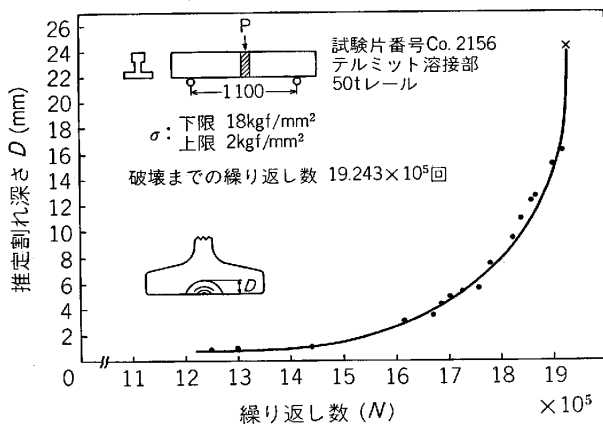


図4 疲労傷進展深さと繰返し数との関係

り調査した結果の一例である<sup>13)</sup>。レール底面から傷が入った場合、傷の深さが約 5 mm 程度まで進むと、以後の進展はかなり速くなり、傷の深さが約 24 mm となった時点で、ぜい性的に破断した。実用ロングレールでは、疲労傷が足部のどの位置にあるかによつて、進展破断までの経過に差がある。疲労傷が写真4に示したように、レール足部端や、レール足部中央にあり、表面にわれが出ている場合は一般に早期破断が多い。この部位をはずれた場合は、かなり進展して、これら部位まで進展してのち破断するので、破断までの使用経年が頭部の場合同様、やや長くなつている。図3に含まれていないが、58年度に新大阪—岡山間で発生した2件のレール溶接部は、いずれもこの形態であり、開業当初からの溶接部であつた。

頭部傷の列車走行による進展速度は明らかでないが、頭部に何らかの原因で生じた頭部面積の 10% 程度の疲労傷が、通過 t 数 (軸重 × 通過軸数) 約 1000 万 t で 30~50%、1500 万 t で 50~80% に進むことが、OREの実験で示されている<sup>14)</sup>。本実験の条件など詳細は不明である。現在、国鉄の線路は、新幹線東京—新大阪間が年間約 3500 万 t、在来線東海道線で約 4000 万 t である。これら線区で通過 t 数 1000 万 t は期間では3カ月弱となる。

溶接部が破断する時期は、気温が低下しはじめる秋期

おわりや冬期が多く、夏期はほとんどない。

### 5. 溶接部の欠陥と機械的性質

レール溶接部に存在する溶接欠陥には、表3に示すものが認められる<sup>3)</sup>。フラッシュ溶接部に生成するフラットは写真5に示すような、ぜい性破面中に存在するやや光沢の異なる欠陥である。この部分には、Si, Al, Mn, S 等が多く、フラット生成原因は、母材中に存在していた介在物が溶接中心に集積したものと考えられる。

一方、ガス圧接部のフラット破面は写真6に示すような灰色状を呈す破面であり、拡大すると同写真6(b)に示すようなディンプル状となつていて、介在物として、Si, Mn, Al 等の酸化物が認められる<sup>2)</sup>。エンクローズアーク溶接部の母材高温割れは、写真7に示す粒界破面であり、割れの位置は光学顕微鏡で見ると、溶接金属と熱影響部の境界(ボンド部)から1~2結晶粒だけ母材部に入った、熱影響粗粒部であり、再溶融割れと称されているものである。エンクローズアーク溶接の場合、この割れ発生は、レール腹部、頭部に多くあらわれ、足部にはほとんど生じない。

これら欠陥は現行のレール溶接施工では、多くの溶接部に微小なものが存在していると考えられる。前述の溶接部損傷で、これら欠陥から疲労傷が進んだ事例もあるが、欠陥の存在が即疲労傷の進展にはつながらず、存在するレール部位、欠陥の大きさ等が影響する。

各溶接法によるレール溶接部の機械的性質は、欠陥の種類、形態や、母材の熱影響による材質変化により決定

表3 レール溶接部の欠陥と対策

溶接方法	欠陥の種類	対策
フラッシュ溶接	①接合面の介在物(フラット破面など)	①適正溶接条件の選定および機械性能の向上
ガス圧接	①接合面の介在物(フラット破面など) ②母材の高温割れ	①、②適正圧接条件の順守 ①端面仕上げの適正化 ②作業条件の順守
エンクローズアーク溶接	①溶接金属の凝固割れ ②母材の高温割れ、低温割れ ③溶込不足・スラグ巻き込み・ブローホール	①溶接条件の順守 ②溶接熱サイクルの適正化と溶接条件の順守 ③適正溶接操作の順守
テルミット溶接	①底部余盛趾端の切り欠きと母材の脱炭 ②鑄巣・ブローホール・スラグ巻き込み(鑄造欠陥)	①趾端形状の改善と後熱処理の検討 ②モールド、溶剤、操作の改良

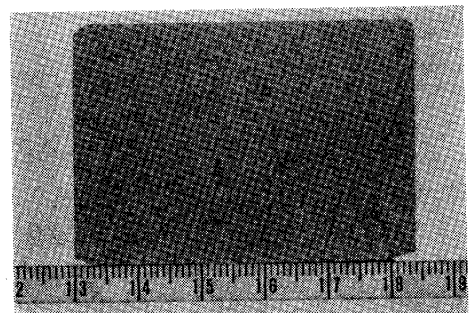


写真5 フラッシュ溶接部のフラットスポット

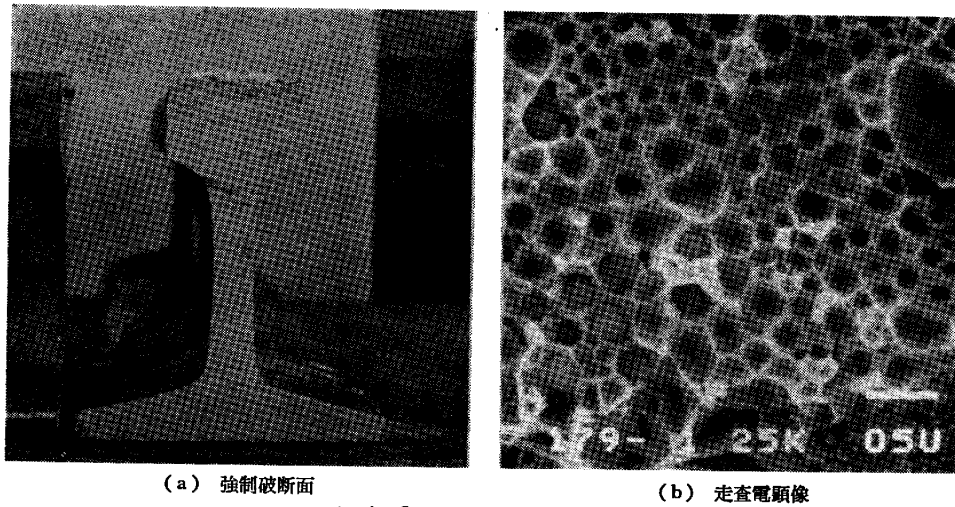


写真 6 ガス圧接部のフラット破面

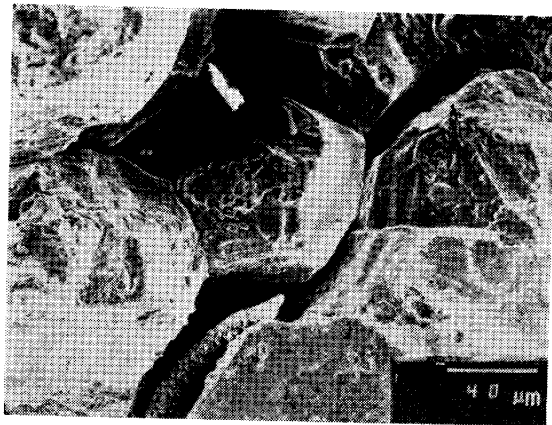


写真 7 エンクローズアーク溶接部の粒界破面

表 4 フラッシュ溶接部の引張試験値

試験片採取位置	引張強さ (kgf/mm <sup>2</sup> )	伸び (%)	絞り (%)	備考 (破断位置, 破面状況)
頭上	85.5	11.0	25.7	軟化部, 延性 溶接線, ぜい性 軟化部, 延性 //
半	72.1	1.6	2.1	
部部	84.9	11.8	28.8	
	84.2	11.2	26.5	
頭下	84.1	12.2	27.1	// //
半	84.0	12.6	26.4	// //
部部	83.9	11.8	27.1	// //
	84.0	13.0	27.7	// //
腹	85.4	7.0	5.9	溶接線, ぜい性 軟化部, 延性 //
部	85.4	12.2	29.2	
	84.1	13.6	29.0	
足	83.4	10.0	27.4	// //
部	81.8	14.2	28.9	// //
	82.7	12.2	27.5	// //
	83.6	12.4	27.6	// //
	85.4	13.0	32.0	// //
	82.8	15.0	30.4	// //

される。

ガス圧接, フラッシュ溶接部の JIS 4 号試験片による引張試験の破断部は, ほとんどが熱影響部と母材との境界の軟化部である。フラッシュ溶接部の引張強さの一例を表 4 に示す。溶接部の伸びがやや低い, 引張強さは母材とほぼ同等である。同表中, 破断部溶接線とある試験片にはフラット欠陥が存在していた。

表 5 エンクローズアーク溶接部の引張試験値

試験片採取位置	引張強さ (kgf/mm <sup>2</sup> )	伸び (%)	絞り (%)	備考 (破断位置, 破面状況)
頭上	77.7	11.2	18.8	ボンド部, ぜい性 // // //
半	78.2	14.9	26.6	
部部	79.6	12.2	18.2	
	79.5	11.0	18.0	
頭下	81.6	11.0	17.3	// //
半	77.2	7.2	8.5	// //
部部				
腹	80.8	5.7	7.0	// //
部	78.0	5.2	6.6	// //
	81.4	6.2	9.5	// //
足	81.5	17.1	52.3	軟化部, 延性 溶接金属, //
	79.9	20.1	52.7	
部	79.6	13.5	35.6	// //
	81.8	11.5	14.3	ボンド部, ぜい性
	80.3	18.3	47.5	溶接金属, 延性
	79.8	19.6	59.8	// //
	79.8	20.3	54.7	// //

表 6 溶接部の静的曲げ試験値

溶接方法	フラッシュ溶接	ガス圧接	エンクローズアーク溶接	テルミット溶接	
破断荷重 (t)	頭上 (足部引張)	178~189	175~190	161~186	135~149
	頭下 (頭部引張)	166~186	165~182	125~150	125~131
たわみ (mm)	頭上	62~77	54~90	51~71	18~24
	頭下	51~83	65~96	20~41	14~17

エンクローズアーク溶接, テルミット溶接部の引張試験破断位置は, 溶接金属あるいはボンド部がほとんどである。エンクローズアーク溶接部は, 溶接施工が腹部・頭部が連続溶接であり, 母材部の過熱が著しいので, ほとんどがボンド部破断となる。引張強さも 80 kgf/mm<sup>2</sup> 前後であり, 伸びも少ない。表 5 にエンクローズアーク溶接部の引張試験結果の一例を示す。テルミット溶接部の場合, 破断位置が溶接金属中央, 凝固時のデンドライト会合部である。伸びはかなり低い。

表 7 新材質レールの化学成分と機械的性質

鋼種記号	化 学 成 分 (%)									機 械 的 性 質			備 考 (組織, 用途, 現状等)
	C	Si	Mn	P	S	Cr	V	Mo	その他	引張強さ (kgf/mm <sup>2</sup> )	伸び (%)	硬さ (HB)	
A	0.80	0.23	0.89	0.018	0.008	—	—	—	—	127	15	365	微細パーライト, 耐摩耗, 耐シェリング 頭部熱処理, 大阪地区敷設中
B	0.77	0.80	0.82	0.021	0.006	0.49	—	—	Nb 0.008	135	19	380	微細パーライト, 高軸重用, 耐シェリング 頭部熱処理, 敷設計画中
C	0.34	0.32	1.19	0.019	0.008	1.22	0.07	0.18	B 0.0020	110	14	325	ベイナイト, 耐シェリング, 耐蝕 名古屋地区, 新関門トンネル敷設中
D	0.54	0.37	1.43	0.021	0.006	1.01	0.05	—	—	101	19	320	パーライト, 耐シェリング 名古屋地区敷設中
E	0.54	0.90	1.34	0.014	0.007	0.87	—	—	Cu 0.18	114	15	300	パーライト, 耐蝕 新関門トンネル敷設中
現用鋼 (参考)	0.67	0.22	0.88	0.018	0.010	—	—	—	—	89	14	240	パーライト

レール溶接部実物を、溶接部を中心にスパン 1 m で支え、中央に静的荷重を加える曲げ試験による各溶接部の破断荷重および破断までのたわみの一例を表 6 に示す。フラッシュ溶接、ガス圧接部は母材とほぼ同等である。エンクローズアーク溶接部は、頭部が引張側となる場合、母材に比べればかなり低下する。テルミット溶接部は足部が引張の場合でも、かなり低下する。

破断位置はフラッシュ溶接、ガス圧接は接合部、エンクローズアーク溶接はポンド部で、微小な溶接欠陥が破断起点となる。テルミット溶接の場合は、足部引張の場合、余盛部の微小な欠陥、あるいは非金属介在物が起点となつている。

### 6. 新材質レールの溶接

現在わが国で使われているレールの大部分は、C 0.60 ~ 0.75% の高炭素鋼で、圧延したままで、ほぼ 100% のパーライト組織が得られるものである。しかしながら、この鋼では、レールの特性として、必ずしも十分でない点もあり、耐摩耗性の要求される曲線部に、レール頭部を熱処理により硬化させた焼入れレールが用いられたり、分岐器のクロッシング部分に、継目を少なくし、高速走行を可能とするため、溶接性を考慮した合金鋼レールが一部用いられてきた。

ここ 10 年ぐらい前から特殊用途向要望は更に強くなり、在来とは異なつた新材質レールが開発され、試験的に利用された。曲線部で耐摩耗性を一段と向上させた、改良頭部熱処理レール、海底部トンネル用で耐食性向上をねらつた合金鋼レール、新幹線用で耐シェリングき裂性向上をねらつたレールなどである。表 7 はわが国で試験中、あるいは使用計画中のこれらレールの化学成分、機械的性質の一例である<sup>1)</sup>。

在来の高炭素鋼に用いている溶接施工条件を、そのまま適用した場合、曲線用耐摩耗性レールなど、熱処理レールは、溶接することで、母材の熱処理効果が失われ、頭部の硬さは、ほぼ圧延されたままの硬さにまで下が

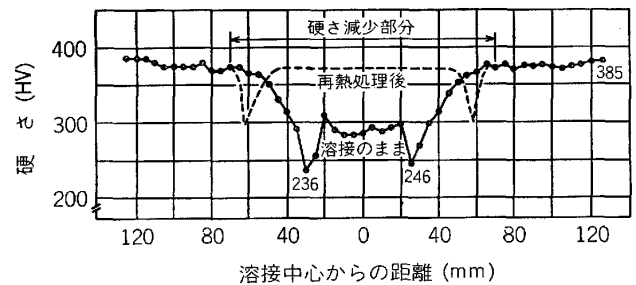


図 5 熱処理レールガス圧接部の硬さ分布

る。このままでは溶接部のみが局部摩耗する。合金鋼レールは、焼入性、硬化性が向上しているので、母材以上に溶接部が硬化する。

図 5 に、レール頭部をスラック・クエンチングして、微細パーライトとし、硬頭化された耐摩耗性レールを、ガス圧接で接合した場合の溶接部の硬さ分布を示す。母材硬さ HB 380 に対し、溶接時の熱影響を受けた部分では、硬さの低下が著しい<sup>1)</sup>。

この硬さ低下に対しては、溶接直後の溶接部がオーステナイト状態にある高温域から急冷して、溶接部を硬くする方法、溶接部が冷却後、再度局部的に加熱し、局部再熱処理を行う方法等が検討されてきた<sup>15)</sup>。熱処理部の組織は焼入れ焼もどしの QT 組織、スラッククエンチングした微細パーライト組織の二つがある。QT 組織は、微細パーライトに比べ、耐摩耗性が劣ることが、明らかとなり、微細パーライト組織とする方法を用い、熱処理レールのロングレール化溶接が、最近本格的にはじまつた<sup>16)</sup>。

本レールのガス圧接、フラッシュ溶接部は、その溶接方法から、異材金属が溶接部に入ることがなく、局部熱処理で、母材と同様硬くすることができるが、異材金属となるエンクローズアーク溶接、テルミット溶接部は、焼入硬化性に差があるため、局部熱処理は困難である。このためエンクローズアーク溶接では、レール頭頂部の硬さが、溶接のままで、ほぼ母材と同程度の硬さとなる



溶接棒を開発試作し、試験的に利用している。テルミット溶接部については、溶接金属の組成を母材と同等にすることが容易であるので、溶接金属部も局部熱処理により、微細パーライト化を検討している。

溶接部の局部熱処理後は、 $A_{r1}$  点近傍に加熱された部分に軟化部が生ずる。この軟化部が広ければ、この部分で局部摩耗が進行する恐れがある。ガス圧接部に適用した局部熱処理は軟化部が約 15 mm 程度である。溶接のままのエンクローズアーク部は、これよりやや広い。現在どの程度、これら軟化部で摩耗が進むか、追跡中である。

表7に示した鋼種Bも、頭部をスラッククエンチングした硬頭レールである。本レールの特徴は、高炭素鋼レールに、若干の合金元素を添加し、焼入硬化性をやや高め、溶接したままでも、溶接部の硬さがほぼ母材と同等になることをねらったものである<sup>17)</sup>。もともとは、高軸重貨車の走行する石炭、鉱石を運搬する鉄道向きで、高強度耐摩耗用として開発されたものであるが、新幹線の耐シェリング用としても使用可能であり、現在使用を計画している。本レールの溶接は、基本的に上述の微細パーライト組織レールと同じ、施工法を検討している。

合金鋼レールは、海水耐食性レールが新関門トンネルに敷設されている。青函トンネル向けの予備試験的意味もある。敷設後、約4年を経過したが、溶接部と母材部とで、とくに耐食性に差は認められない。本レールの溶接は、ガス圧接で行われたが、在来レールに比べ、高温強度が大であり、圧接時の加圧力変更のほか、硬化性があるため、溶接後の局部焼なまし処理等を行つた。

新幹線耐シェリング用としての合金鋼レールは、ガス圧接、エンクローズアーク溶接でロング化し、敷設中であるが、溶接部は、母材部に比べ硬さ分布が一樣とならず、これが原因で、母材部との摩耗に差が生じ、凹凸が大きくなっている。また硬化部に表面きずの発生も生じた。母材部も若干表面きずの生じている部分もある。

## 7. あとがき

わが国におけるレール溶接に関し、溶接法、溶接部の強度を主にのべた。ロングレール化は、今後も国鉄、民鉄でますます進められると考えられる。在来レール溶接部の疲労による損傷は、溶接時の欠陥防止策で対応できると考えられるが、新材質レール等で問題となる溶接部の摩耗は、今後溶接施工、材質面からも解決を要す点である。特に高速走行になるほど、局部摩耗が線路保守量の増大をもたらすといわれており、列車のスピードアップに際し、これら問題の解決も要望されている。

### 文 献

- 1) 滝本正: 鉄道技術研究資料, 39 (1982) 1, p. 18
- 2) 滝本正, 大石橋宏次: 鉄道線路, 25 (1977) 10, p. 514
- 3) 中田充則, 田村庸一, 野村博一, 上田正博, 渡辺祐作, 森 三郎: 日本鋼管技報 (1981) 88, p. 57
- 4) 大井一郎: 金属材料, 5 (1965) 4, p. 72
- 5) 松原健太郎: 新幹線軌道の施工法 (1964), p. 51 [国鉄新幹線局]
- 6) 大石橋宏次, 大原宗行, 杉田久男, 大島米三, 桶田正昭: 鉄道線路, 22 (1974) 7, p. 361
- 7) J. A. N. CLEVERS and J. W. A. STEMERDINK: Welding J., 39 (1960), p. 223
- 8) 安藤精一, 森三郎: 東海道新幹線に関する研究 (第5冊) (1964), p. 125 [鉄道技術研究所]
- 9) H. G. FINCK: テルミット溶接法 (1983) [(株)峰製作所他]
- 10) 栗原利喜雄他: 鉄道技術研究報告 No. 1099 (1978年11月)
- 11) 鎌山正則, 斎藤正: 製鉄研究 (1964) 247, p. 4974
- 12) 栗原利喜雄: 鉄道技術研究報告 No. 1188 (1981年10月)
- 13) 私信: 土柵敏夫, 国鉄委員会資料 (1965)
- 14) 伊藤篤: 鉄道技術研究所速報, No. 67 (1967), p. 71
- 15) 私信: 国鉄レール材質改善委員会資料 (1965年3月)
- 16) 大石橋宏次, 上山且芳, 大原宗行, 佐々木 秀: 鉄道技術研究所速報, No. 82-1023 (1982)
- 17) 私信: 新日本製鉄(株)資料