

レール溶接の脱特殊技能化の検討

○ [土] 井上 拓也 [土] 高尾 賢一 (西日本旅客鉄道株式会社)

Examination of simplifying the rail welding process requiring no special skills

○Takuya Inoue, Kenichi Takao, (West Japan Railway Company)

Rail welding is an essential and important in track maintenance work, but since it requires special and highly skills and it is not easy to secure workers. It is considered that simplifying the rail welding process so that it does not require special skills. For conventional lines, differentiating standards according to the line section grade and simplifying process with some devices are considered. In anticipation of the introducing thermite welding on the Shinkansen line, countermeasures for center-line shrinkage are considered, which is the main cause of breakage.

キーワード：レール，テルミット溶接，エンクローズアーク溶接，凝固割れ

Key Words: rail, thermite welding, enclosed arc welding, center-line shrinkage

1. はじめに

レール溶接は、レール交換工事に不可欠な重要工事であるが、一般的な軌道工事と大きく異なることや極めて高度な熟練技能を要することから、技能確保や技能者養成は専らレール溶接専門会社に依存している。近年は、少子高齢化や労働嗜好の変化の影響を受けて従事者の減少や高齢化が顕著であり、将来に亘りレール溶接を安定的に実施できる体制の確立が急務となっている。

JR 西日本（以下、当社という）においては、レール溶接の脱特殊技能化として、レール接着工法の開発¹⁾に取り組んできたものの、レール溶接に比べると性能が劣るためレール溶接全体の代替とはならないことから、溶接作業の脱特殊技能化を図ることとした。

在来線においては、施工数量が最も多いテルミット溶接に関して熟練技能を要する工程の脱特殊技能化に取り組むこととした。また、新幹線において、当社管内の現地溶接で標準的に施工されるエンクローズアーク溶接については、従事者の技量が溶接品質に大きく影響する溶接法であるため、極めて高度な熟練技能を有する従事者の確保が一層懸念されている。そこで、簡便なレール溶接法であるテルミット溶接の新幹線への適用に向けて、主たる折損原因である凝固割れの発生メカニズムと対応策について検討した。本稿では、これらの取り組み成果を報告する。

2. テルミット溶接の脱特殊技能化

2.1 概要

テルミット溶接の主な作業工程は、芯出し、溶接、仕上げ、検査である。テルミット溶接の脱特殊技能化として、特に熟練の技能を必要とする工程である芯出し、仕上げ及び超音波探傷検査の脱特殊技能化を図ることとした。

2.2 芯出し作業

芯出し作業の脱特殊技能化を目的として、ねじ式でレール位置の微調整を容易に可能とする芯出し治具を開発した。芯出し治具は、レール締結装置の埋込栓や線ばね用シヨルダーを使ってまくらぎ上に固定し、通り方向と高低方向の調整機能及び調整時のレールの小返り防止機能を有するものである（図1）。従来は、くさびを打ち込み過ぎた場合に大幅な手戻りが生じるが、ねじ式の場合は手戻りなく調整可能なので経験の浅い技能者でも作業時間が安定する効果が期待できる。

2.3 仕上げ作業

在来線の仕上り基準は、線区グレードによらず一律となっているが、列車速度が遅く、走行頻度の少ない下級線においては基準緩和の可能性があると考えられる。

仕上がり基準緩和の方向性として、具体的な数値設定ではなく、溶接部をレール母材に対して滑らかにすることを仕上がり条件にすることで性能規定化の可否を検討した。テルミット溶接においては、溶接後の温度低下による落ち込みを考慮して、あらかじめ芯出し時に 3.5~4.0mm（1m 弦あたり 2mm 程度）の逆ひずみ量を設ける（図2）。この逆ひずみ量は、温度低下後においても 1m 弦あたり 1~1.5mm 程度残存することから、1m 弦あたり 0.5mm の仕上り基準を満たすためには、溶接部の外方のレール母材まで広

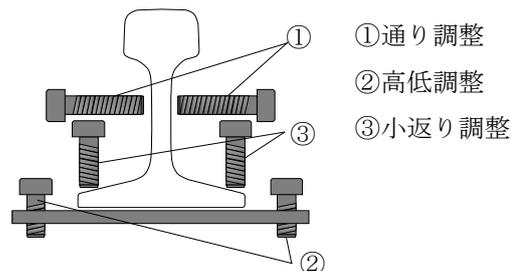


図1 芯出し治具の調整機構

範囲に削正する必要があり、作業に時間を要するとともに熟練の技能が必要となる。これに対し、溶接部のみの研磨を基本としてレール母材に滑らかにとりつける場合は、作業が容易に短時間で可能となる。

この場合の溶接部の仕上がり状態が与える影響について、車両運動シミュレーション²⁾を用いて確認した結果、現状の仕上り基準の2倍の凹凸量であっても上下動揺の値が0.01g程度の増加であることから、乗り心地や軌道変位に与える影響は十分小さいと考えられる(図3)。

また、仕上り基準緩和を前提として、後述のレール溶接部研磨装置の使用により研磨作業を効率的かつ容易に実施可能としている。

2.4 超音波探傷検査

テルミット溶接はこれまでの各種品質向上の取り組みの成果により、当社における過去20年間の折損原因は凝固割れに限られている。超音波探傷による下首部の凝固割れ検知には、底部二探触子法における首振り走査が有効であるが、検査者の技量が精度に大きく影響する手法である³⁾。以上から、凝固割れ検知に特化し、個人の技量に依存しない探傷方法として、タンデム探傷を検討した。

タンデム探傷は、凝固割れが溶接部中心のレール下首部においてレール軸方向に対して垂直方向に発生するため、送信側及び受信側の斜角探触子を下首部中心狙いで配置して実施する(図4)。作業は、専用治具の使用により探触子を容易かつ安定的に配置して実施可能とした。

探傷結果は、凝固割れの有無によるビーム路程の違いを利用して判定する。凝固割れの有無の違いのあるレールを対象としたタンデム探傷結果を表1に示す。凝固割れの有無によりエコーの立ち上がり位置が異なり、レール高さと同程度の位置にエコーが検出された場合には、凝固割れ有りとして判定可能であることを確認している。

2.5 現地試験

(1) 試験概要

実用化に向けて営業線における現地試験を実施した。試験は、短レールを用いた損傷レール交換工事のレール溶接2口において実施し、主要な作業は、経験の浅い技能者(溶接資格取得から1年未満及び2年未満)により施工した。

(2) 試験結果

現地試験における各工程の作業時間について、従来工法や熟練技能者との比較を表2に示す。全体を通して、経験の浅い技能者であっても、本工法の適用により熟練技能者と同程度の作業時間、従来工法と比較すれば短時間で施工

可能であることを確認した。

芯出し作業においては開発した芯出し装置を使用して施工した。また、仕上げ作業においては、レール溶接部研磨装置により施工した(図5)。本装置は、レール母材高さに砥石高さを合わせて溶接の凸部を研磨するため、容易に溶接部をレール母材に対して滑らかにとりつけることが可能である。なお、仕上りを確認した結果、1m弦あたり0.50mmと0.55mmであり良好な仕上りであった。

本試験では、超音波探傷とタンデム探傷を併用したため検査時間は参考である。検査結果は、凝固割れ無しの判定であり、タンデム探傷で容易に判定可能であった。

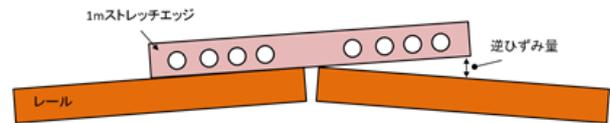


図2 芯出し時の逆ひずみ量と測定イメージ

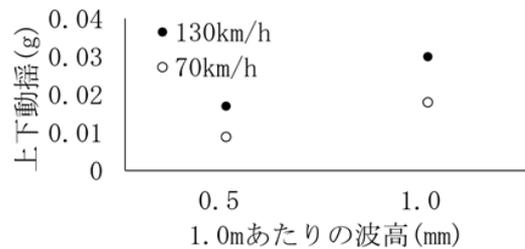


図3 車両運動シミュレーション結果

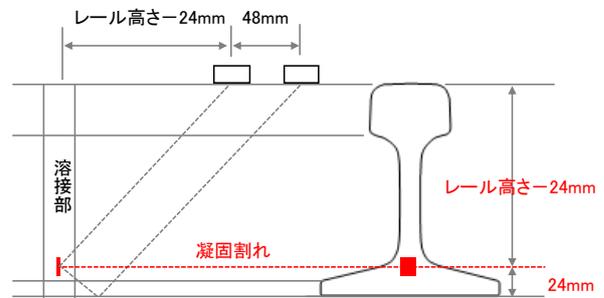


図4 タンデム探傷による凝固割れ検知

表1 タンデム探傷試験におけるエコー位置

レール種別	60kg	50kgN
欠陥なし	184mm (N=4)	166mm (N=4)
凝固割れ	173mm (N=4)	153mm (N=1)
(参考)レール高さ	174mm	153mm

表2 現地試験における作業工程毎の所要時間の比較

作業工程	熟練の技能が必要	経験の浅い技能者		時短効果	(参考) 熟練技能者
		今回実績	従来工法		
切断・開先設定	—	5	5	—	5
芯出し	○	10	15	33%減	10
溶接 (機材設置~押し抜き)	—	25	25	—	25
仕上げ	○	55	80	31%減	60
検査	○	15	15	—	10
合計		110	140	21%減	110



図5 レール溶接部研磨装置による仕上げ作業

3. テルミット溶接の新幹線への適用に向けた検討

3.1 凝固割れ発生メカニズムの検討

(1) 概要

テルミット溶接の新幹線への適用にあたっては、現在標準的に施工されているエンクローズアーク溶接と同等以上のレール折損防止性能が要求される。溶接部の欠陥の特徴として、エンクローズアーク溶接はレール頭部に発生しやすく、直ちにレール折損に至ることは考えにくいですが、テルミット溶接の凝固割れは早期に折損に至るものである。そこで、凝固割れの発生を防ぐことが極めて重要であることから、再現試験による発生メカニズムの検討を行った。

凝固割れは、溶接金属の最終凝固段階でレールが軸方向に引っ張られることで溶接金属中心部に発生する高温割れである⁴⁾。当社では凝固割れ対策として、鑄込み後3分間はレールに引張力あるいは衝撃を与えないこととしているが、それでも稀に発生することがある。

(2) 再現試験内容

現地施工で想定されるレール移動を溶接金属の凝固段階で強制的に加える凝固割れ再現試験を実施した。試験では、レール移動のタイミング（溶鋼注入からの経過時間）と移動量が凝固割れ発生に影響すると考えられることから、これらの条件を変化させて合計20口分の試験を実施した。

実施した試験種別一覧を表3に示す。試験種別は、レール移動の想定に基づいてA～Dの4種類とした。各試験種別の試験方法の概略を図6に示す。試験種別Aは、レール軸方向に動く場合を想定した試験であり、遊間整正器によりレールを左右同時に引っ張る方法によりレール移動を与えた。試験種別Bは、衝撃でレール軸方向に動く場合を想定した試験であり、レールに固定した留め金にくさびを挿入し、くさびに打撃を加えることによりレール移動を与えた。試験種別Cは、衝撃によりレールが下方向に動く場合を想定した試験であり、上方から打撃を加えることによりレール移動を与えた。試験種別Dは、ねじり方向に動く場合を想定した試験であり、芯出し時に用いるくさびの増し打ち等によりレール移動を与えた。

試験におけるレール移動量について、試験種別Aはレール端部に設置した変位計により測定し、試験種別Bはレールと土台に印した罫書線のずれ量を測定した。試験種別C及びDは、レール底部と土台の隙間量を移動前後で測定して算出した。

表3 試験種別一覧

種別	レール移動	移動方法	口数
A	引張	遊間整正器	14
B		打撃	2
C	下移動	打撃	2
D	ねじれ	打撃・締結緊締	2

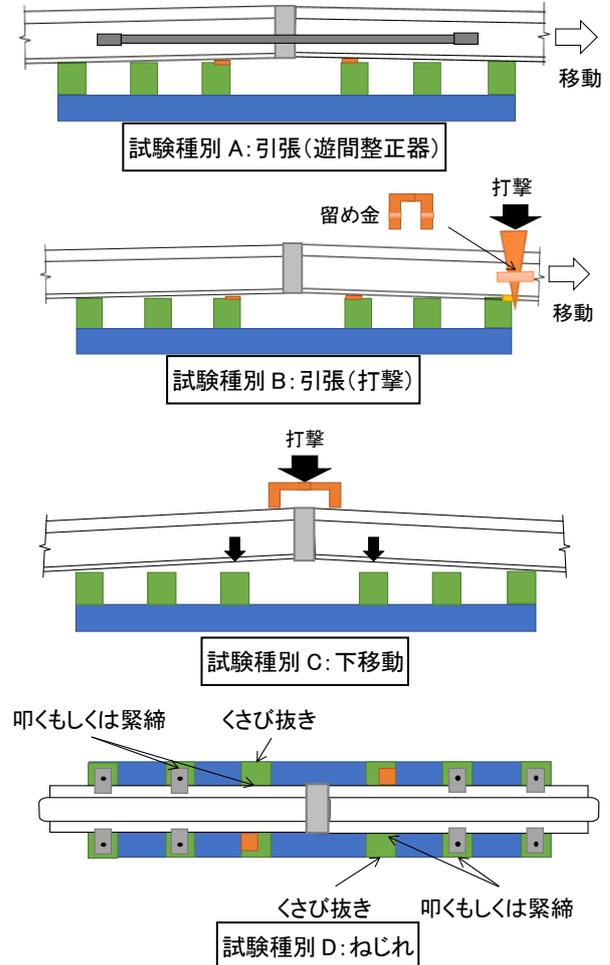


図6 各試験方法の概略図

試験におけるテルミット溶接は、通常の溶接条件を適用し、施工後に外観、浸透探傷検査及び超音波探傷検査（頭頂面一探触子法、底部二探触子法）を実施して欠陥の種類及び発生位置を調査した。

(3) 再現試験結果

試験結果一覧を表4に示す。試験種別AのNo.1～5において、溶鋼注入からの経過時間が長くなるにつれて、割れの位置がレール底部から頭部側に変化した（図7）。これは凝固が底部から頭部に推移するためであり、この結果から下首部に凝固割れが生じるのは溶鋼注入からの経過時間80～120秒程度の中にレール移動がある場合と考えられる。また、No.1～5は目視観察でも判別可能な割れが生じており、レール移動量が大いいためであると考えられる。現地で見られる内部のみの欠陥を再現するため、以降の試験はレール移動量0.5mm以下を基本として実施した。

表4 再現試験結果一覧

No.	試験種別	経過時間(s)	移動量(mm)	外観割れ	凝固割れ
1	A 引張 (遊間整正器)	123	2.0	○	○
2		126	0.5	○	○
3		138	1.0	○	—
4		108	0.9	○	○
5		76	2.0	○	—
6		109	0.5	—	—
7		92	0.4	—	◎
8		89	0.4	—	◎
9		92	1.0	—	—
10		115	0.3	—	—
11		98	0.2	—	—
12		107	0.4	—	◎
13		100	0.2	—	◎
14		103	0.1	○	—
15	B 引張(衝撃)	99	1.0	—	—
16		82	1.6	○	—
17	C 下移動	100	4.9	—	—
18		90	8.6	—	—
19	D ねじれ	84	0.2, 0.5	—	—
20		100	-0.4, -1.6	—	—

No.6~14の結果, No.7, 8, 12, 13の合計4口の溶接部に, 現地で発生するものと同様にレール下首部内部に凝固割れが発生した. このときの条件として, 溶鋼注入からの経過時間は89~107秒, レール移動量は0.2~0.4mmであった. 一方で, 試験種別B, C, Dに関しては, 外観上の割れが確認されるものがあったが, いずれも凝固割れは発生しなかった.

(4) 凝固割れ発生原因に関する考察

試験結果から, 凝固割れは溶鋼注入からの経過時間80~120秒の間でレール軸方向0.2~0.4mm程度の移動量でも発生する可能性があると考えられる. 凝固割れの発生と移動量に明確な関係がなく必ずしも類似の条件で発生しないことについては, 既往の研究⁴⁾で指摘されているように, 腹部と下首部内部の凝固の時間差が短く, 実際に発生するタイミングがさらに限定的であるためと考えられる.

3.2 凝固割れ対策の検討

(1) 対策の基本的な考え方

前述の再現試験において, 凝固割れの発生と移動量に明確な関係がないことや極めて僅かな移動量でも発生する可能性が示唆された. 対策として, 0.2mmの移動量を抑えることで凝固割れの発生を防止できる可能性は否定できないものの, 発生自体が極めて偶発的であり, 0.2mmという把握すら困難な移動量を考慮すると, 移動防止用の装置の開発への注力は非効率であると考えられることに加え, 装置の重厚化等による大幅な作業性の低下が懸念される.

そこで, 凝固割れが発生した場合においても, 検査精度を高めて確実に検知し, 速やかに処置を行うことが重要と考えた. 検査精度向上については, 前述の凝固割れに特化

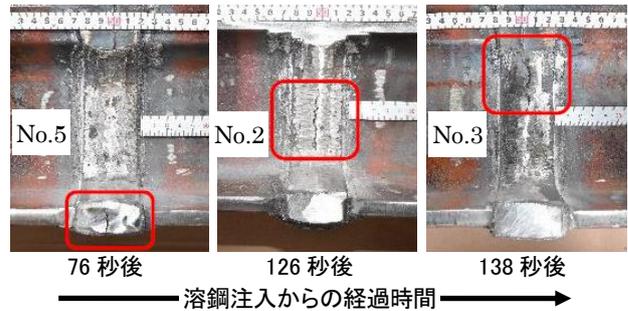


図7 溶鋼注入からの経過時間と割れ位置の関係



図8 テルミット溶接部用接着継目

した検知方法であるタンデム探傷を超音波探傷検査と併用することが有効と考える. また, 処置方法としては, 接着継目による開口防止を検討した.

(2) テルミット溶接部用接着継目の開発

凝固割れが生じた溶接部について, 万が一の開口防止を目的として, テルミット溶接部用の接着継目を開発した.

基本的な接着構造は, レール接着工法¹⁾を適用し, テルミット溶接部専用の継目板として, 接着面積を確保しつつ溶接の凸部に対応可能な形状とした(図8). 接着面をディスクグラインダーによりケレンし, 試験片を製作して引張強度を確認した結果, 2時間経過後で1.88MNであり, ロングレール不動区間のレール軸力0.7MNに対して十分な引張強度を有していることを確認した.

4. おわりに

今回, テルミット溶接の脱特殊技能化及び凝固割れへの重点的な対策について一定の成果が得られたことから, 今後は実用化に向けた検討を進めていく. 将来的には現場溶接の完全自動化の実現を目指したい.

謝辞: 本取り組みにおける車両運動シミュレーションにあたっては, (公財)鉄道総合技術研究所にご協力を頂いた. ここに厚く御礼申し上げる.

参考文献

- 1) 井上拓也, 庄野真也, 高尾賢一, 加藤篤史: 常温硬化型接着剤を用いたレール接着工法の開発, 日本鉄道施設協会誌, 55巻11号, pp44-46, 2017.
- 2) 土木関係技術基準調査研究会: 鉄道に関する技術基準(土木編), pp59-64, 2002.
- 3) 寺下善弘, 伊藤太初: テルミット溶接部の凝固割れ発生条件と防止策に関する検討, 日本鉄道施設協会誌, 55巻1号, pp28-31, 2017.
- 4) 伊藤太初, 寺下善弘, 辰己光正, 山本隆一, 設楽英樹: テルミット溶接部における凝固割れの発生条件と折損防止策, 鉄道総研報告, Vol.23No.10, pp59-64, 2009.