

新幹線高速区間に適用可能なテルミット溶接法

寺下 善弘* 高木 雄太**

Aluminothermic Welding Method Applicable to Shinkansen High-Speed Sections

Yoshihiro TERASHITA Yuta TAKAGI

In a previous study, aiming at introduction of an aluminothermic welding method to Shinkansen lines, we developed the aluminothermic welding method that can improve bending fatigue strength. However, since the rails at the base of the rail foot weld collar did not melt slightly, and this had to be removed by grinding. In addition to this, there is concern about the occurrence of “solidification crack” in the aluminothermic welding method, which is a factor preventing its introduction to the Shinkansen lines. Therefore, in this study, we solved the problem that the rail at the base of the rail foot weld collar does not melt by improving the mold shape and welding conditions. We also generally clarified the mechanism of solidification crack and proposed a welding procedure to prevent it.

キーワード：テルミット溶接，曲げ疲労強度，未溶融部，余盛形状，三分割モールド，凝固割れ

1. はじめに

東海道新幹線建設に国産のテルミット溶接法が適用されたが、開業当初から溶接部の曲げ疲労強度に起因した損傷が頻発して問題となり、現在でも、一部の新幹線を除いてテルミット溶接法の適用が制限されている^{1) 2)}。そのため、新幹線の高速区間における現場溶接施工は、主に緊張ガス圧接法とエンクローズアーク溶接法によって担われているが、前者はレール移動を許容できない分岐器付近の施工には適用できず、後者は技術者に高い技量が求められるとともに、必要な技量を有する技術者自体を確保することが困難になっている。

そこで、レール移動を必要とせず、溶接技術者の確保が比較的容易であり、在来線において多くの適用実績を有するテルミット溶接法に着目し、現場溶接法の選択肢を広げるため、先行研究では余盛形状を改良したモールドの使用に併せて余盛止端部の研削を組み合わせることで、曲げ疲労強度を向上させ、新幹線高速区間に敷設可能な工法を開発した³⁾（以下、「提案法」とする）。しかしながら、提案法は図1に示すレール底部領域の余盛止端部にわずかな未溶融部が残存する場合があります、図2のように余盛止端部を研削加工して未溶融部を完全に除去するとともに、磁粉探傷検査にて未溶融部が完全に除去されたことを確認する必要がある。

また、新幹線軌道にテルミット溶接法を導入する際、曲げ疲労強度のほかに、早期折損につながる凝固割れの発生が懸念されていた。テルミット溶接部に生じる凝固

割れは、底部領域における溶接金属の最終凝固段階で、レールが長手方向外方に引っ張られることでレール下部から底部領域の溶接金属中心部に生じる割れと考えられている⁴⁾が、レール移動のメカニズムなど未解明の部分が残っており、新幹線への導入が進まない一番の要因となっていた。

本研究ではこれらの課題を解決するため、未溶融部を解消するためのモールド形状および溶接条件を見直した「改良法」を提案するとともに、凝固割れの発生防止策を提案した。また、前述した提案法を用いた新幹線軌道における敷設試験を実施し、高速区間における現場溶接法として実用化の目処をつけた。

2. 未溶融部解消のための改良法の開発

余盛内に位置するレールを十分に溶融させるためには余盛止端部の角度を増加させて溶鋼の充填される領域を拡大することが有効であるが、余盛止端部が応力集中しやすい形状となり、曲げ疲労強度向上が見込めないという、相反する難しさを有している。

そこで本研究では、提案法のモールドの内部形状を一



図1 余盛止端部の未溶融部 図2 余盛止端部の研削処理

* 軌道技術研究部 レールメンテナンス研究室

** 元 軌道技術研究部 レールメンテナンス研究室

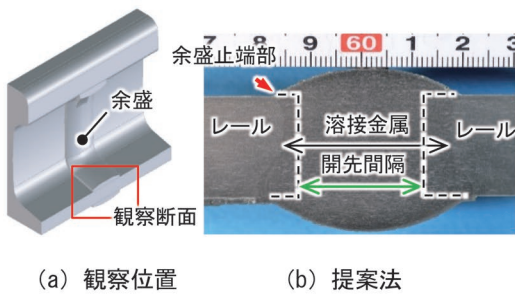


図3 レール底部領域の余盛断面形状

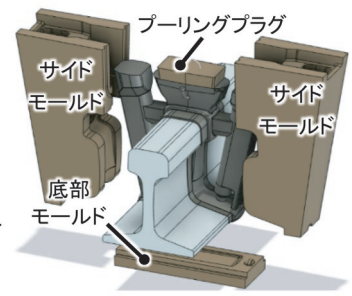


図4 3分割モールド

部改良するとともに、予熱時間やレール開先間隔（以下、「先先間隔」という）の溶接条件を変更することで、未溶融部を解消する方法（以下、「改良法」とする）を提案した。

2.1 モールド形状の改良

図3に、提案法と改良法のレール底部領域の余盛止端部形状を示す。これまでの検討結果³⁾から、レール底面側には200MPa以上の圧縮残留応力が生じるため、荷重载荷時にレール底部に引張方向の応力が作用しても絶対値として小さい値に留まることから、曲げ疲労強度にほぼ影響を及ぼさないと判断し、提案法のなだらかな形状に比べて溶鋼の充填領域を拡大できる直角形状とした。また、底部上面側は、余盛止端部の角度を変更した複数のモールドによる事前検討で、応力集中により曲げ疲労強度に及ぼす影響が最も小さかった提案法と同じ形状を採用した。さらに曲げ疲労強度向上の観点から鑄バリの発生を抑制するとともに、表面きずや湯漏れの施工不良の発生を防止するために、現行の2分割モールドではなく、レールとモールドとの隙間を極力小さくでき、かつ施工性も高い図4に示す3分割のモールド構造とした。

2.2 レール開先間隔および予熱時間の選定

表1に本研究で試作した改良型モールドを用いて実施した代表的な試験体作製時の溶接条件と試験体作製後に未溶融部の発生状況を確認するために実施したレール底部上面余盛止端部に対する磁粉探傷試験結果を示す。

表1 代表的な試験体作製時の溶接条件と底部上面余盛止端部の磁粉探傷結果

| TPNo. | 開先間隔 (mm) | 予熱時間 (秒) | 磁粉探傷による未溶融部の有無 |
|-------|-----------|----------|----------------|
| 1* | 25±1 | 150 | 発生 |
| 2 | 25±1 | 180 | 発生 |
| 3 | 25±1 | 195 | 未発生 |
| 4 | 29±1 | 150 | 発生 |
| 5 | 29±1 | 180 | 未発生 |

*提案法の溶接条件

なお、本試験では提案法の溶接条件（開先間隔：25±1mm、予熱時間：150秒）を基準として、予熱時間の延長と開先間隔の拡大の有効性を確認することを目的とした。なお、予熱炎のガス圧力は、標準の酸素0.5MPa、プロパン0.15MPaである。

予熱時間を延長あるいは開先間隔を拡大した試験体で余盛止端部の未溶融部の抑制効果が認められたものの、同様の条件で作製した複数の試験体で未溶融部の発生の有無にばらつきがあることが判明した。そこで、安定した溶け込みを達成するためにはさらなるレール底部の予熱温度上昇、すなわち予熱時間の延長が必要と判断した。

図5は、さらなる予熱時間延長の可能性を検証するためには実施した予熱試験の結果であり、図中に示す開先面となるレール端面から5mm内側の頭部（H）、腹部（W）、底部中央（B1）および底部足部（B2）の温度履歴である。また、提案法の溶接条件での予熱温度を目安として破線で併せて示している。なお、予熱試験はワンタッチ式継手（日東工器製）を2箇所を使用した現場仕様のホース構成（ホース長20m）にて実施しており、上述した試験体作製時のホース構成（ワンタッチ式継手なし、ホース長10m）と比較して、ガス圧力がより低下することとなる。

また、通常の溶接施工では予熱が完了した後にルツボを設置し、溶剤に点火して生じるテルミット反応によって溶鋼がモールド内に注入されるまで40秒程度の時間を要する。未溶融が生じやすい底部足部の温度を高い状

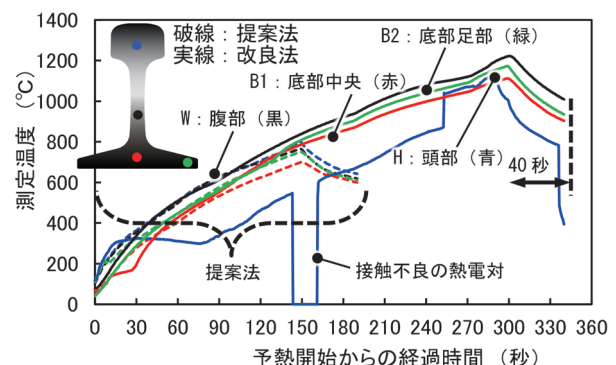


図5 温度測定試験結果

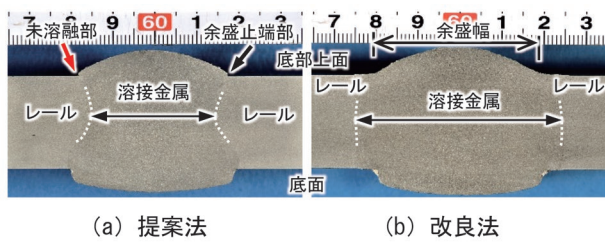


図6 底部足部の縦断面マクロ組織

表2 試験体作製時の溶接条件

| モールド | 開先間隔 (mm) | 予熱時間* (秒) | ボンベ圧力 (MPa) | |
|-----------|-----------|--------------------------------|-------------|------|
| | | | 酸素 | プロパン |
| 改良法 | 29±1 | 300 | 0.5 | 0.15 |
| 逆ひずみ (mm) | 静置時間 (秒) | テルミット溶剤 (るつぽ) | | |
| 4.0-5.0 | 420 | 60/Z90 SkV-Elite L25 (シングルユース) | | |

*現場仕様のホース構成

態に維持することなどが望ましいと考え、この時点（グラフの終端である予熱完了から40秒経過後）での温度を評価することとした。

改良型モールドを用いて提案法の2倍となる300秒まで予熱した結果、予熱完了から40秒経過後の底部中央および底部端部のレール温度はそれぞれ903℃、935℃となり、提案法の条件と比較して約300℃高く維持できることを確認するとともに、予熱時間延長に伴うモールドの溶損は認められなかった。なお、予熱時間を延長した際の頭部領域の温度は、熱電対の接触不良により正しい値が計測されていないが、一部のデータよりその他の領域と大差はないと判断した。

図6に提案法に比べて予熱時間を2倍の300秒、開先間隔を4mm拡大（29mm±1mm）した溶接条件で作製した試験体の底部足部（底部側面から40mm内側）で観察した縦断面マクロ組織を、提案法の溶接条件で作製した試験体と比較して示す。提案法では、やや黒く見える溶接金属（溶融領域）がレール板厚の中央付近で最も狭くなっているとともに、底部上面余盛止端部では余盛幅を超えてレールが溶融しておらず、未溶融部が発生する状況となっている。一方、改良法では余盛幅を十分に超えてレールが溶融しており、この条件で安定して未溶融部を解消できる見通しを得た。

2.3 改良法の曲げ疲労強度

表2に示す改良法の溶接条件で作製した5本の試験体における曲げ疲労強度を評価するため、レール底部領域に引張応力の作用するHU（レール頭部を上向き）姿勢にて、支点間距離1300mm、中央載荷点距離150mm、載荷周波数3Hzの4点曲げ疲労試験を実施した。なお、

表3 曲げ疲労試験結果

| TPNo. | 応力全振幅 (MPa) | 繰り返し数 (回) | 破断の有無 (破壊起点) |
|-------|-------------|-----------|--------------|
| 6 | 210(240-30) | 2,000,000 | 未破断 |
| | 240(270-30) | 2,000,000 | 未破断 |
| | 270(300-30) | 907,119 | 破断(底面) |
| 7 | 250(280-30) | 1,081,511 | 破断(底面) |
| 8 | 240(270-30) | 1,909,258 | 破断(底部上面) |
| 9* | 240(270-30) | 2,000,000 | 未破断 |
| | 250(280-30) | 2,000,000 | 未破断 |
| | 260(290-30) | 2,000,000 | 未破断 |
| | 270(300-30) | 1,112,242 | 破断(母材) |
| 10* | 260(290-30) | 920,960 | 破断(底面) |

*底部上面余盛止端部研磨

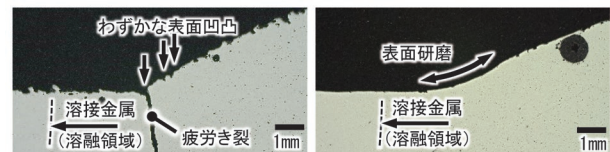


図7 底部上面余盛止端部の溶融状況と表面形態

底部上面余盛止端部に対する磁粉探傷試験を実施した結果、未溶融部の発生を示唆するきず磁粉模様は、いずれの試験体にも観察されなかった。曲げ疲労試験は、レール底面における最小応力を30MPaとする片振り条件を採用し、繰返し数200万回を限度として、破断の有無で曲げ疲労強度を評価した。なお、200万回の繰返し載荷で未破断の場合は、レール底面における応力全振幅をさらに10～30MPa増して再度曲げ疲労試験に供することで、応力全振幅210～270MPaの範囲の10ケースを評価した。表3に試験結果を示す。なお、TPNo.6～TPNo.8の3本の試験体は後処理をしない溶接ままである。図7に底部上面の余盛止端部をレール長手方向に切断した断面で観察した溶融状況と表面形態を示す。これより、余盛止端部を超えて十分にレールを溶融できているが、溶接ままでは図7(a)に示すように底部上面の余盛止端部にわずかな表面凹凸が存在し、ここから疲労き裂が発生して破断に至った。そのため、TPNo.9、TPNo.10の試験体では図7(b)に示すように、溶接施工後に後処理としてわずかな表面凹凸を研磨している。

また、応力全振幅が250MPa以上の試験条件で、レール底面の余盛止端部から破断する試験体が見受けられた。通常、レール底面側は大きな圧縮残留応力が作用するため、270MPa程度までの試験条件では底面の余盛止端部が破壊起点となることはない³⁾。しかしながら、当該試験体作製では、溶接直後に試験体を運搬したため、底面モールドが早期に外れた試験体が存在した。その結果、底面側の冷却速度が早くなり、残留応力や表面硬さにばらつきが生じ、250～270MPaの試験条件でも底面

余盛止端部から疲労き裂が発生して破断に至った可能性がある。

これより、改良法で施工した溶接部の曲げ疲労強度は、後処理をしない溶接ままの試験体で、応力全振幅が240MPaで未破断あるいは200万回直前で底部上面余盛止端部から破断した結果に加えて、250MPa以上の応力全振幅条件でも破壊起点とならなかったことより、240MPa程度の曲げ疲労強度を有していると判断した。また、溶接施工後に底部上面余盛止端部のわずかな表面凹凸を研磨することで、無欠陥のエンクローズアーク溶接部の曲げ疲労強度と同程度の260MPaまで向上できることを確認した。

以上の試験結果から、改良法は未溶融部を解消でき、かつ曲げ疲労強度を後処理なしで240MPa程度に向上可能であり、さらに底部上面余盛止端部のわずかな表面凹凸を研磨除去することで260MPa以上に向上可能である。なお、この曲げ疲労強度を達成するためには、底面および腹部領域のモールドは、溶接部の温度が300℃以下になるまで（出鋼完了から40分程度）保持しておくことが必要と考える。

3. 凝固割れ発生メカニズム解明とその防止策

3.1 テルミット溶接施工時のレール挙動

1986年以降、JRグループにおいて、営業線上でテルミット溶接部が凝固割れの溶接欠陥を原因として折損、あるいは撤去に至った事例は、鉄道総研が把握しているだけで35件に上る。この中で資料として残っている当時の事故速報や施工記録を改めて確認した結果、詳細な記載がないものも多かったが、凝固割れが発生した溶接施工には、以下に示すような傾向が認められた。

表4に各施工形態の件数を整理して示すように、凝固割れが発生しやすい施工形態として、損傷レール交換、EJやIJ撤去のように交換するレールの両端を本線上で溶接するケース（「以下、「2口施工」とする）が、1箇所溶接施工となるロングレールの設定替えなど（以

表4 凝固割れ発生の施工形態

| 施工当日の溶接施工数の件数 | |
|---------------|----|
| 1口施工 | 2 |
| 2口施工(両端) | 26 |
| 不明 | 7 |
| 2口施工(26口)の施工順 | |
| 1口目 | 2 |
| 2口目 | 13 |
| 不明 | 11 |

下、「1口施工」とする）に比べて圧倒的に多いことがわかる。また、2口施工の内、施工順序が明らかとなっているケースを抽出すると、2口目の施工箇所凝固割れが多く発生していることが判明した。

短尺レール交換において緊張器1台で交換箇所を囲い込む溶接施工や緊張器を使用しない溶接施工を想定すると、挿入した短尺レールはほとんどレール締結装置での固定ができないため、2口目の溶接施工における溶鋼の凝固段階で、1口目の溶接部の凝固、冷却に伴う収縮によって、2口目の溶接箇所において短尺レールが1口目の方向に引っ張られると考えられる。このように、2口施工の1口目の溶接部の凝固、冷却に伴うレール収縮が、2口目での凝固割れ発生に影響していると考え、試験軌道を用いて2口施工を想定した溶接施工時のレール挙動を測定した。

溶接試験は、図8に溶接試験時のレール配置、レール締結状態およびレール変位測定位置の概略を示す。ここで、6mレール（以降、「短尺レール」という）の終点方レール端部は、2口施工時の2口目の溶接箇所を想定している。この短尺レールと18.1mレールに継目板で拘束した4.2mレールをテルミット溶接し、両レール端部の変位の経時変化を予熱開始から測定した。なお、溶接部の頭頂面温度が約300℃に達した時点で、水をかけて冷却した。

溶接試験は短尺レールの締結条件の違いを比較する目的で2回実施し、1回目は溶接部の凝固、冷却に伴うレール挙動を把握するためにほぼ無締結とし、2回目は

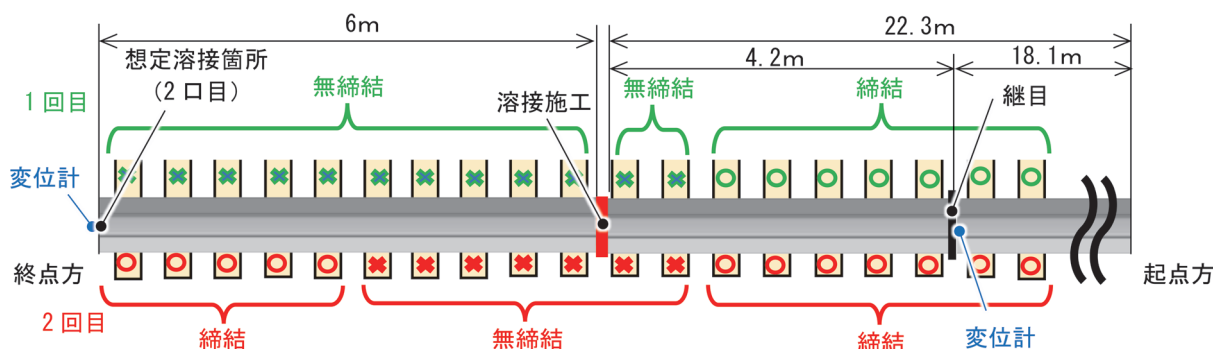


図8 溶接試験時のレール配置、締結状態と各測定位置の概略

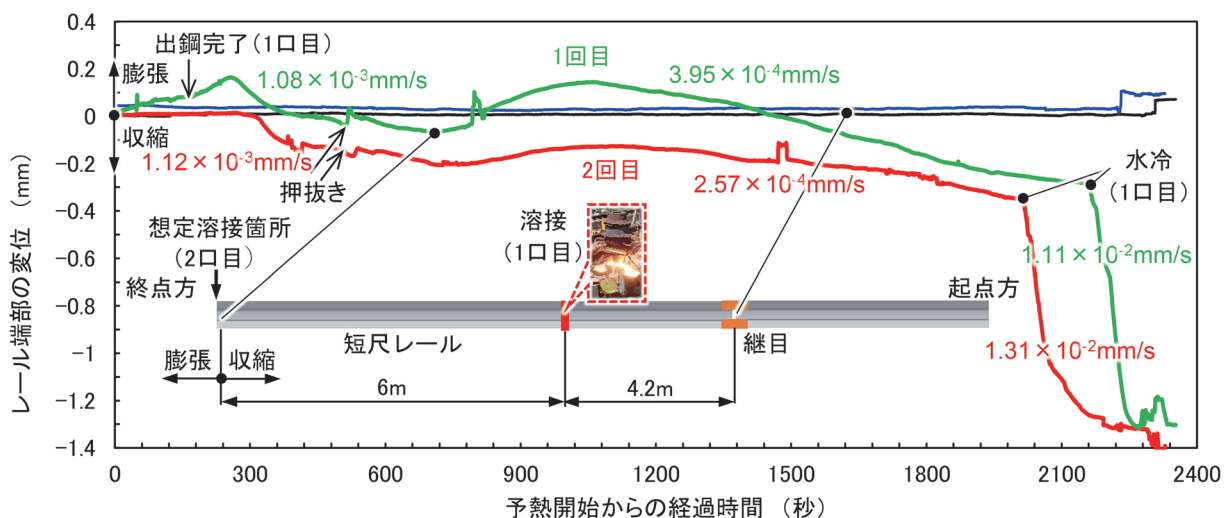


図9 溶接施工時のレール端部の挙動

実施工での締結箇所数を再現した。なお、本試験では、在来線で使用されているテルミット溶接（現行法、通称ゴールドサミット溶接）の材料と溶接条件を用いることとした。

図9は、1回目および2回目の溶接試験における短尺レールの終点方レール端部と4.2mレールの起点方レール端部の変位である。測定結果より、予熱および溶鋼充填によって溶接部付近のレールが膨張することで、短尺レール端部も伸びる方向に移動し、溶鋼の凝固がある程度進む（出鋼完了から100秒程度）と、溶鋼の凝固、収縮に伴い、今度は縮む方向にレール端部が移動していることがわかる。また、レール頭部余盛の押抜きが完了した後、再びレール端部は伸びる方向に移動しているが、これは溶接部が相変態（原子配列が変化すること）⁵⁾の生じる温度域まで冷却して一時的に膨張することに起因していると推察する。その後は、溶接部の温度低下に伴い、レール端部が徐々に縮む方向に移動し、溶接部の頭頂面温度が約300℃に達した時点で、水冷処理を施すと、さらに速い速度で縮んで移動していることがわかる。

なお、5本のまくらぎのレール締結装置を緊締した2回目では、予熱および溶鋼充填によるレール移動が抑制されるとともに、レール端部の変位量に若干の差はあるものの、溶鋼の凝固、冷却過程で短尺レール端部が伸び縮みする挙動およびタイミングに大差はないことを確認した。

3.2 凝固割れの再現試験

凝固割れの発生要因とされる被溶接レールが長手方向外方に引っ張られる原因が、3.1節で述べた1口目の溶接部の凝固、冷却に伴う収縮と考え、その状況を再現するため、溶鋼の凝固段階で被溶接レールを長手方向外方へわずかに移動させる溶接試験方法を考案し、実施した。

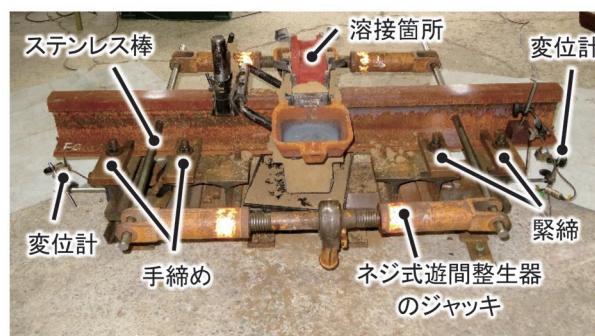


図10 考案した凝固割れ再現試験方法

図10に再現試験の状況を示すように、左右の被溶接レールの開先面から約400mm離れたレール腹部に穿孔した継目穴（φ25mm）に、長さ1mのステンレス棒（SUS304、曲げ剛性3.14N・m²）を挿入し、ネジ式遊間調整器（鉄友工業（株）製：レールキャッチ部を除くジャッキ部のみ）を差し込んで操作してジャッキを伸ばさせることにより、ステンレス棒を介してレールに最大約10kNの引張力を作用させた。また、右側の被溶接レールは溶接台に締結して固定させ、左側のレールは可動できるように締結部のネジを手締めとし、被溶接レールの両端に設置したカンチレバー式変位計で、予熱開始からの変位を測定した。なお、溶接試験ではレールに引張力を作用させるタイミングと移動量をパラメータとして、14ケース実施した。また、レールに引張力を作用させるタイミングは、一連の試験におけるレール移動の状況から出鋼完了から60～100秒の範囲で変化させた。

図11に測定結果の一例を示す。溶鋼充填によって溶接部付近のレールが膨張し、出鋼完了から約85秒でネジ式遊間調整器のレバー操作を繰り返した結果、可動可能な左側のレール端部は、さらに約0.1mm外方に移動

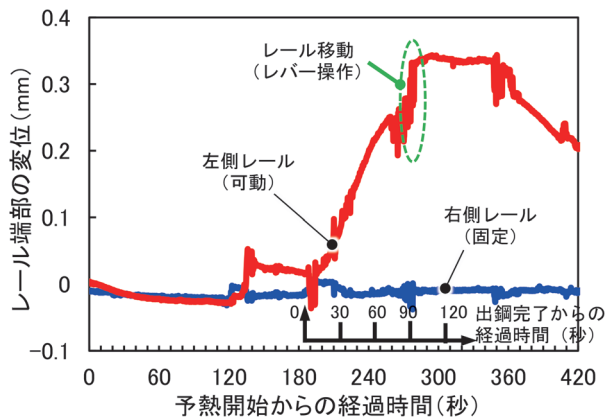


図 11 再現試験におけるレール挙動測定結果の一例

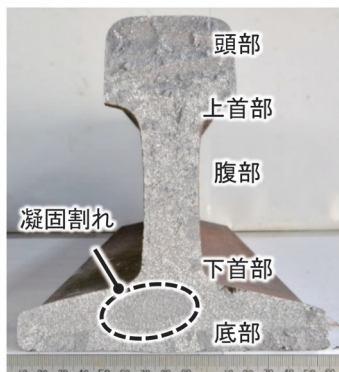


図 12 再現した凝固割れの破断面

した。また、溶接部の凝固が完了した時点でステンレス棒を撤去すると、溶接部の凝固、収縮に伴い左レール端部が徐々に内側に移動した。

再現試験での凝固割れ発生の有無および発生領域を確認するため、1m スパン中央集中荷重による静的曲げ試験を実施し、溶接部を強制的に破断させた。図 12 に破断面を示すように、下首部から底部領域に営業線上で早期折損する溶接部と同様の形態の凝固割れが観察された。破断荷重は 600kN であり、60kg 普通レールテルミット溶接部の曲げ破断荷重とたわみ量の基準値 (HU: 1080kN-10mm) に比べて著しく低く、このような凝固割れが生じたテルミット溶接部は短期間で折損に至る可能性が高い。

このように、溶鋼の凝固段階でステンレス棒によって被溶接レールを長手方向外方にわずかに移動させることによって、営業線で生じる凝固割れを再現することができた。

なお、一連の再現試験では、引張力を作用させて出鋼完了から 75~95 秒の範囲でレールが移動し、かつ移動量が 0.25mm までに留まった場合に、図 12 と同様の凝固割れを再現できた。その一方で、同様のタイミングでレールを移動させても、溶鋼の温度が低下して凝固がよ

表 5 各工法によるレールが伸びるタイミング

| | 出鋼完了からの経過時間(分 秒) | |
|-----|------------------|------------------------------------|
| | 溶接完了時間 (静置時間) | レールが伸びるタイミング |
| 現行法 | 6'00" (4'00") | 09'06" ~ 15'03" 08'59" ~ 15'18" |
| 改良法 | 9'00" (7'00") | 13'14" ~ 19'11" |

り進んだ状態ではレールが移動しないケースが見受けられた。この結果より、営業線で生じる凝固割れは底部領域の凝固が完了して溶接部がある程度の強度を有する 20 秒程度の中に、10kN 未満の作用力を受けて発生している可能性がある。

3.3 凝固割れ発生防止のための施工手順

3.1 節および 3.2 節の結果から、連続する 2 口施工を想定したケースでは 2 口目の溶鋼の凝固段階が、1 口目の溶接部の変態に伴い膨張するタイミングに合致すれば、理論的には凝固割れは発生しないと考える。

表 5 に、3.1 節で示した溶接試験における 1 口目の溶接部が膨張してレールが伸びるタイミングを整理する。なお、本溶接試験は上述した現行法だけではなく、2 章で検討した改良法でも実施しており、その結果も併せて示す (図 9, 図 13 から読み取った時間)。ここでは、1 口目の溶接箇所溶鋼がモールド内に充填されてからの経過時間で示す。また、表 5 中に示した溶接完了時間とは、静置時間 (溶鋼の凝固が完了してモールドの解体を開始するまでの時間) に、約 2 分程度を要するモールド解体とレール頭部余盛の押抜き作業を見込んだ目安である。これより、現行法と改良法では入熱量が異なるために、1 口目の溶接部が膨張するタイミングに違いがあるものの、溶接完了時間から約 3~4 分後に膨張し始め、6 分程度膨張し続ける傾向はほぼ同じである。

図 13 は 3.1 節で示した溶接試験と同様の試験において、改良法を用いて測定したレール端部 (2 口目の溶接箇所) の変位に、凝固割れ発生防止として提案する 2 口目の溶接施工のタイミングを重ね合わせて示したものである。1 口目の溶接施工が完了した後、1 分程度で速やかに 2 口目の溶接施工 (予熱) を開始することで、2 口目の溶接部の凝固と 1 口目の溶接部が膨張するタイミングが合致していることがわかる。また、溶接部の温度低下に伴うレールの移動速度は、最大でも約 $3.0 \sim 4.0 \times 10^{-4} \text{mm/s}$ であることから、底部領域の凝固が完了して溶接部がある程度の強度を有する 20 秒程度での移動量は十分に小さいと考える。これより、2 口目の溶接部の凝固段階がこのタイミングから外れた場合でも、即座に凝固割れの発生につながる可能性は低いと考えるが、常

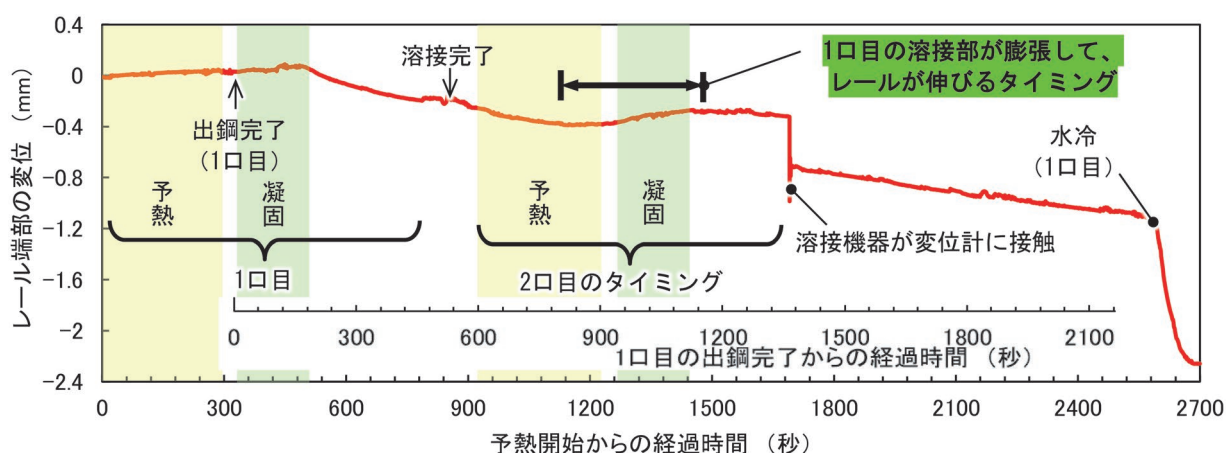


図 13 改良法による 2 口施工を想定したレール端部の変位と溶接施工のタイミング

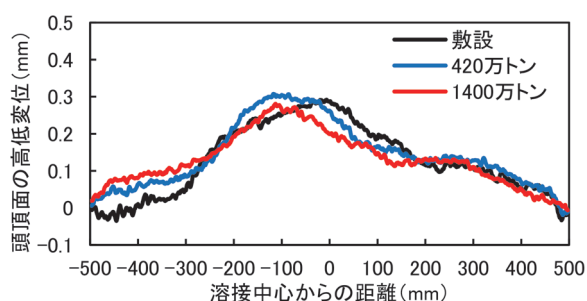


図 14 試験溶接部の頭頂面形状の推移例

にレールが等速で縮むとは限らないため、1口目の出鋼完了から現行法で約7分後、改良法で約10分後に2口目の溶接施工（予熱）を開始する手順が凝固割れの発生防止策としては有効と考える。また、上記の施工手順は、短尺レール交換を想定した場合であり、長尺レール交換などでは、緊張器を2台使用する、あるいは溶接機材を2組持参できる場合には、2口同時に溶接する施工手順も凝固割れ発生防止策として有効である。

4. 新幹線軌道での試験敷設結果

新幹線高速区間へのテルミット溶接法の導入のために、提案法で施工したテルミット溶接部について、まずは低速区間である東海道新幹線大井車両基地への回送線に試験敷設して、経時変化状態を追跡調査した。また、1年6か月にわたる追跡調査（累積通過トン数約2170万トン）で異常が発生しないことが確認されたことから、高速区間における経時変化を検証する目的で、提案法で施工したテルミット溶接部を営業線に試験敷設し、調査を開始した。なお、いずれも基地で溶接施工したテルミット溶接部を敷設したものである。

図 14 は、営業線の高速区間に敷設した溶接部のレール長手方向の頭頂面形状の推移の例である。頭頂面形状は、敷設から約1400万トンの累積通過トン数でも、敷

設時とほとんど変化がなく、溶接金属や熱影響部境界での局所的な落ち込みなども見受けられず、良好に推移していることがわかる。また、超音波探傷試験においても、敷設時の検査結果から変化はなく、底部余盛止端部からの疲労き裂の発生などの異常が発生していないことを確認した。なお、今後は、累積通過トン数1億トン程度まで追跡調査を継続し、最終的な評価を行う予定としているが、概ねテルミット溶接法の新幹線高速区間への導入に目処が付いたと考える。また今後は、本研究で開発した「改良法」について試験敷設を進め、現場溶接法としての施工性も含めてテルミット溶接法の有効性を確認する予定である。

5. まとめ

テルミット溶接法を新幹線高速区間における現場溶接法として実用化することを目的とし、先行研究（提案法）で課題として残ったレール底部上面余盛止端部の「未溶融部」の発生を解消し、かつ曲げ疲労強度の向上が可能なテルミット溶接法（改良法）を開発するとともに、早期折損につながる「凝固割れ」の発生防止について検討した。本研究で得られた主な成果は以下のとおりである。

- (1) 余盛止端部への応力集中を低減するために、レールとの密着性が高い3分割モールドを採用して内部形状に改良を加えた。さらに、溶融性能を向上させて未溶融部の発生を解消するために、現行法に比べて予熱時間を2.5倍、開先間隔を4mm拡大することで、施工性に影響を及ぼすことなく曲げ疲労強度を230MPa以上に向上可能な施工法を開発した。
- (2) ネジ式遊間調整器を用いて溶鋼の凝固段階でのわずかなレール移動を可能とする試験方法を考案し、営業線上で早期折損する溶接部と同形態の凝固割れを完全に再現した。また、溶接施工時のレール挙動を把握することで「凝固割れ」の発生メカニズムを

- 概ね解明し、これを防止する施工手順を提案した。
- (3) 提案法の新幹線軌道での試験敷設を経て、新幹線高速区間での実用化に目処をつけた。

文 献

- 1) 栗原利喜雄：レール損傷に関する研究，鉄道技術研究報告，No.1188，pp.284～299，1981
- 2) 坂口和弘：九州新幹線におけるゴールドサミット溶接の本
格導入，日本鉄道施設協会，Vol.59，No.9，pp.27-28，2021
- 3) 寺下善弘，山本隆一，岩崎幹大，相澤宏行：曲げ疲労強度の向上が可能なテルミット溶接工法の開発，鉄道総研報告，Vol.35，No.4，pp.11-16，2021
- 4) 伊藤太初，寺下善弘，辰巳光正，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.23，No.10，pp.59-64，2009
- 5) 矢島悦次郎，市川理衛，古沢浩一：若い技術者のための機械・金属材料，丸善，1967