

- 鉄道一般
- 車両
- 軌道
- 構造物
- 防災
- 電力
- 信号通信情報
- 材料
- 環境
- 人間科学
- 浮上式鉄道

テルミット溶接部の信頼性向上を目指して

テルミット溶接(☞参照)は、主にレールの溶接法として使用されており、JRグループでは約4割の施工比率を占めています。現在、日本では、1979年にドイツから導入した工法が適用されており、30年以上が経過した現在、その信頼性は高く評価されています。しかしながら、稀に溶接欠陥に起因して溶接部が損傷に至る場合があります。ここでは、鉄道総研における損傷防止のための取り組みを概説します。

テルミット溶接の現状

テルミット溶接とは酸化鉄とアルミニウムの酸化還元反応(テルミット反応)によって発生した溶けた鉄をレールとレールの間に取り付けたモールド(型枠)内に流し込む溶接法です(図1)。この溶接法は、使用する機材が持ち運びやすく、溶接時間が比較的に短いため、終列車後の線路内におけるレール溶接(三次溶接)に多く適用されています。

JRグループにおける2011年度のテルミット溶接の施工数は2万箇所余りで、施工比率は全体の約4割を占めています。表1に、最近10年間における溶接法別の施工比率と折損率(折損数÷施工数)を示します。テルミット溶接部の折損率は、エンクローズアーク溶接部に次ぎますが、その割合は0.006%と、諸外国での折損率と比較してはるかに低いものです。

また、図2にJRグループにおけるテルミット溶接部の施工年度毎の折損

率の推移を示します。約20年前当時のテルミット溶接部の折損原因の大半は、融合不良、凝固割れおよび信号用レールボンドに起因するハンダ割れでした¹⁾。この内、融合不良に対しては予熱条件の見直しを実施され、ハンダ割れは信号用レールボンド付着レールの取り扱い基準が定められた結果、折損率は大きく減少し、これらによる折損はここ10年以上発生していません。しかしながら、最近でも僅かながら折損が発生しており、これらのほと



図1 ゴールドサミット溶接

☞ テルミット溶接

現在、日本ではゴールドサミット溶接と呼ばれる1979年にドイツから導入した短時間予熱による迅速テルミット法(SkV)が使用されています。なお、レールのテルミット溶接で使用するテルミット剤の最も基本的な反応は、 $[\text{Fe}_2\text{O}_3 + 2\text{Al} \rightarrow 2\text{Fe} + \text{Al}_2\text{O}_3 + 760 \text{ kJ}]$ で示され、熔融金属の温度は約2400℃に達します。



寺下 善弘
Yoshihiro Terashita
軌道技術研究部
レール溶接研究室
副主任研究員
[専門分野] レール溶接
の施工・検査



伊藤 太初
Hajime Ito
軌道技術研究部
レール溶接研究室
研究員
[専門分野] レール溶接
の施工・検査

表1 溶接法別の施工比率と折損率*

溶接方法	施工比率	折損率
テルミット溶接	39%	0.006%
エンクローズアーク溶接	7%	0.012%
ガス圧接	29%	0.001%
フラッシュ溶接	25%	0.000%
合計	—	0.003%

※ 2002～2011年度に施工された溶接部

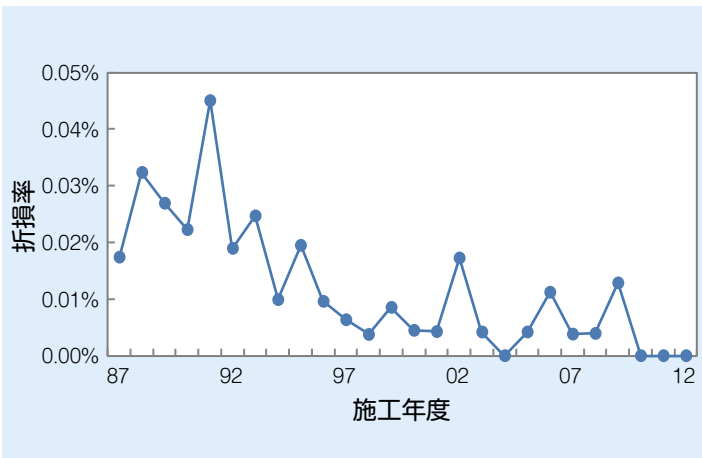


図2 テルミット溶接部の折損率の推移



図3 凝固割れで折損したテルミット溶接部

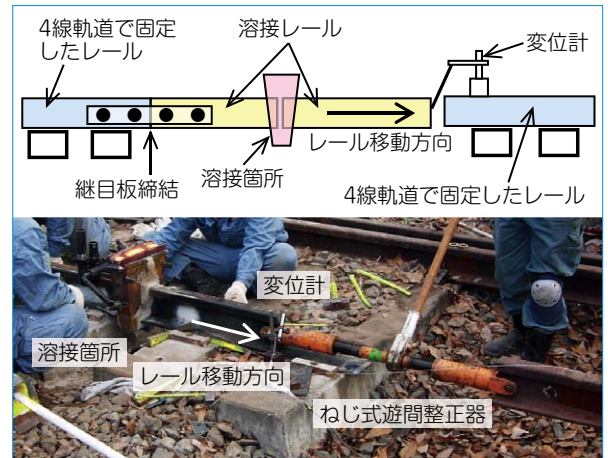


図4 凝固割れ再現試験概略図と再現試験状況

んどが凝固割れに起因していることから、その対策が求められています。

さらに、最近では施工直後の仕上がりが検査で表面きずが検出され、撤去される事象が多く報告されており、表面きず発生の原因を解明し、対策を施すことも課題となっています。

テルミット溶接部の凝固割れ

図3に、本線上で凝固割れにより折損したテルミット溶接部の一例を示します。凝固割れによる折損は、図3(a)に示すようにレール底部の溶接金属中心部から生じ、レール頭部では溶接中心部を外れて破断するのが一般的です。破断の起点となった凝固割れは図3(b)のように、レール下首部の内部に限定して発生するものがほとんどであり、稀に腹部から底部全面に発生する場合があります。

テルミット溶接は、ロングレール区間におけるレール交換や損傷レールの部分交換に用いられます。その場合、決められたレール設定温度(☞参照)までレール緊張器や加熱法等を利用してレールを強制的に伸ばした状態で溶接されます。従って、テルミット溶接部の凝固割れは、レールを引き伸ばす力が不十分であったり、周囲のレール温度が低下したりすることでレールが縮み、溶接金属の最終凝固段階でレールが長手方向外側に引っ張られる(移動する)ことで発生するものと考えられています。

☞ レール設定温度

ロングレール区間では高温時の軌道座屈に対する安全性を確保し、低温時のレール破断開口量を限度値内に抑え、さらには伸縮継目部の伸縮ストロークを一定値に収めるため、軸力がゼロとなる温度を最高レール温度と最低レール温度の中央付近になるように調節して溶接します。この軸力がゼロとなるレール温度をレール設定温度と言います。

凝固割れ再現試験

テルミット溶接部の凝固割れ発生条件を解明するため、溶接金属の凝固中に強制的にレールを移動させることにより、凝固割れを再現する試験を実施しました¹⁾。

図4に凝固割れ再現試験の概略図を示します。試験は鉄道総研構内の試験軌道にて、50kgN普通レールを用いて実施しました。溶接箇所に設置したモールド内に溶鋼が注入された後、予め設定したタイミング(溶鋼注入からの経過時間として定義)で一方のレールを外側に強制的に移動させることで

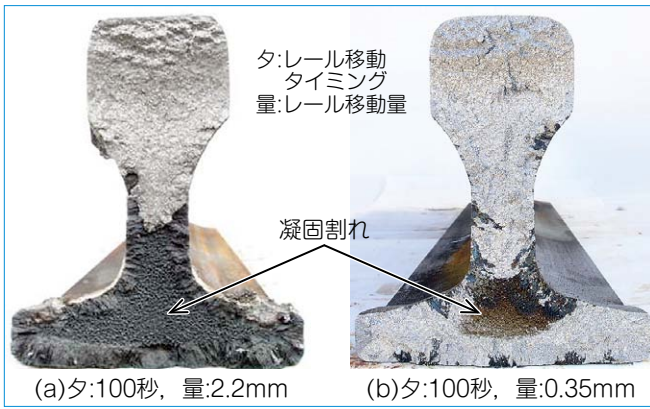


図5 再現した凝固割れ溶接試験体の破面例

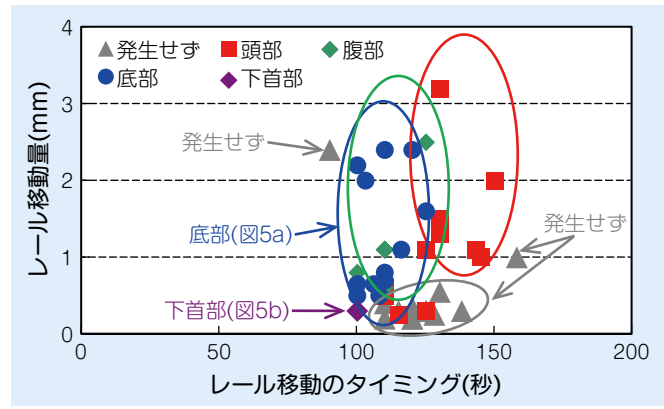


図6 レール移動タイミングと移動量および発生領域の関係

凝固割れの再現を試みました。

図5に再現試験で発生させた凝固割れの代表的な破面例を示します。図中、黒く高温酸化した破面が凝固割れであり、その周囲の金属光沢を呈す領域は曲げ試験により強制破断した破面です。両破面とも、これまでに本線上で折損した溶接部に見られる凝固割れの破面形態であり、図5(b)に示す下首部の内部に発生した凝固割れは、溶鋼注入後100秒のタイミングでレールを0.35mm移動させた場合に発生したものです。

図6にはレール移動のタイミングと移動量の試験条件および凝固割れ発生領域の関係を示します。凝固割れの発生領域は、底部(青で表示)、腹部(緑で表示)、頭部(赤で表示)の3つに大きく分けることができ、溶鋼注入からの経過時間が長くなるにつれて底部から頭部へと発生領域が移動する傾向が認められました。また、溶鋼注入後90秒および160秒の試験溶接部では1mm以上レールを移動させたにもかかわらず、凝固割れは発生しませんでした。これは、溶鋼注入後90秒では溶接金属中央部のどの部位もまだ固まっていない液体の状態であり、一方、溶鋼注入後160秒ではどの部位も凝固が完了して固体となるため、凝固割れが発生しなかったと考えられます。

以上の試験結果から、モールドへの溶鋼注入後90~160秒の間にレールが

移動することが、テルミット溶接部の凝固割れ発生条件であることが判明しました。特に溶鋼注入後100~110秒の場合は本線上で折損した溶接部と同じ形態の底部および下首部内部に凝固割れが発生し、さらに、レール移動のタイミングによってはわずか0.4mm程度の移動量でも凝固割れが生じることがわかりました。

これらのことより、レール移動を防止する観点から、必ずレール緊張器を使用するとともに、溶鋼注入後90~160秒以内は作業を中断し、溶接部を確実に静置することが重要と考え、超音波探傷検査および判定方法と合わせて、折損防止策を提案しています¹⁾。

テルミット溶接部の表面きず

図7に表面きずが発生し、撤去された溶接部の一例を示します。表面きずはブローホール(☞参照)によるものが大半で、図に示すように頭部側面および底部余盛上面に多く発生します。

テルミット溶接は三次溶接に適しているため、そのほとんどが新品レールと敷設されている経年レールとの溶接

☞ ブローホール

溶接金属内部に生じる大小の気泡状の穴。鑄造欠陥の一種。

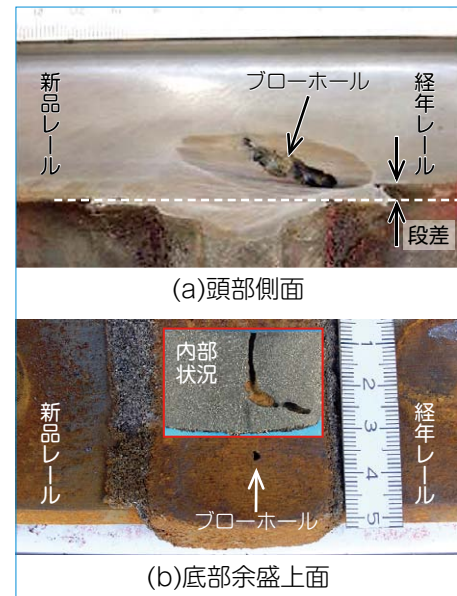


図7 表面きずが発生したテルミット溶接部の一例

施工になってしまいます。経年レールは、頭部が擦り減っており、敷設箇所によっては著しく錆びています。頭部が摩耗していると、頭部の上面を合わせた際にあご部と底部に段差が生じます。このような段差のあるレールにモールドをそのまま取り付けると、図8(a)のようにモールドは新品レール側に大きく傾いてしまい、このような状態では適切な予熱と溶鋼の注入が行えず、溶接欠陥が発生する可能性があります。そこで、経年レールの底部上面に接触する箇所のモールドを段差量に合わせて研削し、モールドを垂直に取り付けることが標準作業となっています。

しかしながら、このようにしてモー

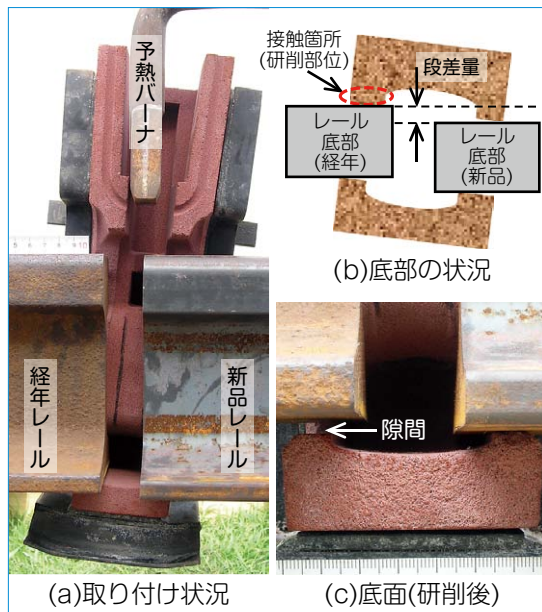


図8 段差レールのモールド取り付け状況

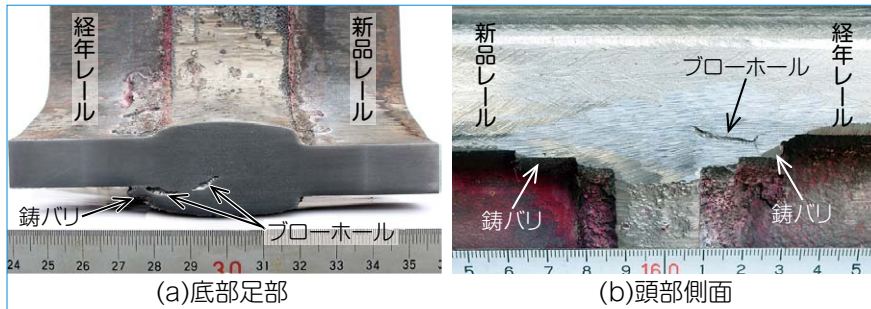


図10 再現したブローホール(表面きず)の一例

ルドを取り付けた場合、経年レールの底面とあご部にはモールドとの隙間が生じてしまいます(図8(c))。なお、施工現場で発生する表面きずは、図7のように大半が隙間の生じた経年レール側から溶接金属中央部に向かって生成した形態をしています。このことから、レール表面の錆や目地砂に含まれる水分が、溶鋼注入後に水蒸気となってブローホール発生に影響している可能性が高いと考えるようになりました。

表面きず再現試験

テルミット溶接部に生じる表面きずの発生要因と考えるレール表面の錆や目地砂からの吸湿の影響を調査するため、普通モールドと図9に示すレール段差に対応した段差モールド²⁾を用いて、経年レールと新品レールとの溶接

試験を実施しました。

試験では始めに段差モールドを用いてレール表面の錆からの吸湿の影響を調査した後、段差量だけ研削した普通モールドを用いて隙間の生じた箇所における目地砂からの吸湿の影響を確認しました。試験の結果、段差モールドを用いた溶接試験体に表面きずは発生せず、錆の影響はないと判断しました。一方、普通モールドを使用した試験体には、図10に示すように経年レール側の鋳バリ(レールとモールドの隙間にはみ出して凝固した溶接金属)から溶接金属内に向かって形成したブローホールが、底部足部および頭部側面に再現しました。

この試験結果から、テルミット溶接部の表面きずは、レール表面の錆ではなく、隙間の生じた箇所における目地

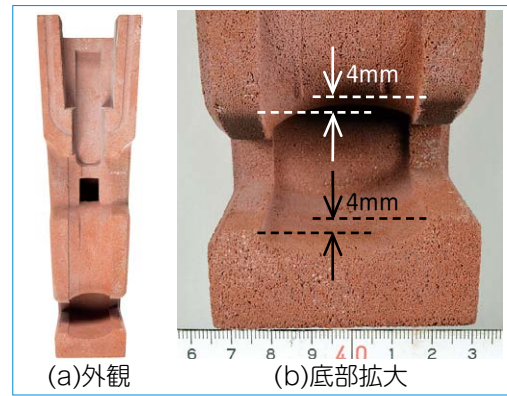


図9 段差モールド²⁾

砂からの吸湿によって発生していることが判明しました。これまで段差レールの溶接施工では、段差量に合わせてモールドを研削して垂直に取り付けることに重点が置かれていましたが、表面きずの発生を防止するためには、レールとモールドの隙間を極力小さくすることが重要であり、その観点から段差モールドの使用が推奨されます。また、段差モールドを使用した場合には、経年レール側の底面とあご部に鋳バリが生じにくく、余盛付根元の形状が良くなる利点も有しています。

おわりに

テルミット溶接部の凝固割れからの折損を防止する対策を提案した結果、最近の3年間では仕上り検査で確実に検出され、折損には至っていません。また、表面きずの発生に対しても、段差モールドの導入が進んでいることから、テルミット溶接部の更なる信頼性向上が期待されます。[RRR]

文献

- 1) 伊藤太初他：テルミット溶接部における凝固割れ発生条件と折損防止策，鉄道総研報告，Vol.23，No.10，2009.10
- 2) 深田康人：レールのテルミット溶接法の最近の技術動向，鉄道総研報告，Vol.15，No.4，2001.4