

テルミット溶接部の凝固割れ折損防止対策

軌道技術研究部 レール溶接

研究員 伊藤 太初

1. はじめに

テルミット溶接法は、使用する機材が簡便で可搬性に富み、かつ溶接時間が比較的短いため、軌道上でのレール溶接に用いられる。図1に、JRグループにおけるテルミット溶接の施工年度毎の施工数、折損件数および折損原因の推移を示す。JRでは、1987年以降、テルミット溶接の施工数が急激に増加し、それに伴い融合不良、ハンダ割れおよび凝固割れ等の原因で折損が発生した。

そこで、融合不良およびハンダ割れに対して適切な対策を施した結果、それらによる折損はここ10年間に施工された溶接部では発生していない。しかしながら、凝固割れによる折損は未だに年間数件発生し、その対策が求められている。そこで、本研究では凝固割れ発生条件を検討するために、テルミット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た。本発表では、凝固割れ再現試験結果とそれを基に検討した凝固割れ折損防止対策について紹介する。

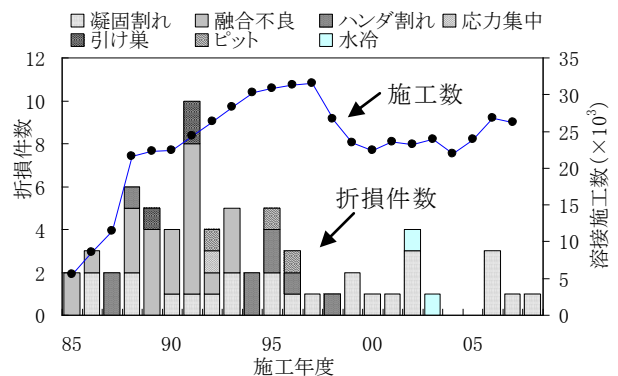
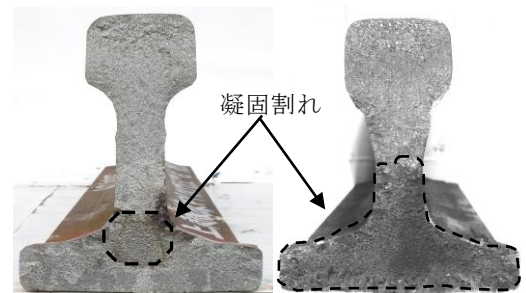


図1 施工数および原因別折損件数

2. テルミット溶接部の凝固割れ

図2に、本線上で凝固割れにより折損した溶接部の破面例を示す。破断の起点となった凝固割れは(a)のように、レール下首部に限定して発生するものがほとんどであり、稀に(b)に示すような腹部から底部全面に発生するものもある。また、凝固割れはマイクロ破面形態に溶接金属の凝固過程で観られるセル状樹枝状晶が認められることから、溶接金属(テルミット溶鋼)の最終凝固段階で発生した高温割れであると判断される。このことから、テルミット溶接部の凝固割れは溶接金属の最終凝固段階でレールが軸方向外方に引張られる(移動する)ことで溶接金属中心部に生じるものと考えられている。また、図3に過去の凝固割れ折損事例を基に折損までの期間を分類した結果を示すが、凝固割れは欠陥面積が比較的大きいため、敷設後6ヶ月以内の早期に折損に至るケースが約8割に達する。



(a) 下首部 (b) 底部全面

図2 折損溶接部の破面例

3. 凝固割れ再現試験

図4に凝固割れ再現試験の概略図を示す。図に示す

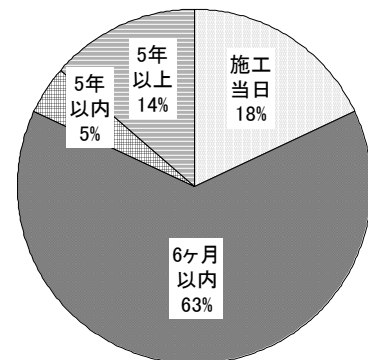


図3 過去の凝固割れ折損事例における折損までの期間

ように、溶接金属凝固中にガス圧接機あるいは遊間整正器を用いてレールを強制的に移動し、カンチレバー式変位計にてその変位量を測定した。作製された試験体に対して、実施工時の仕上がり検査で実施されている超音波探傷検査^リを実施し、曲げ破断試験後、破面上に表出した凝固割れの発生位置および発生面積を調査した。また、テルミット溶接の実施工時に実施されている専用工具(以下、「カスガイ尺」と称す)を用いたレール移動の確認作業も併せて行った。

図5に凝固割れ再現試験結果を示す。図に示すように、本再現試験では溶鋼注入からの経過時間90～160秒でレールが移動した場合に凝固割れの発生が認められ、発生領域は大別して、底部(青で表示)、腹部(緑で表示)、頭部(赤で表示)の3つの領域であった。図6に図5の各発生領域における代表的な破面例を示す。溶鋼注入からの経過時間に注目すると、この発生領域は時間の経過と共に底部から頭部へと変化する傾向が認められた。また、レール移動量に注目すると、0.5 mm以下の条件では凝固割れが発生し難くなるが、溶鋼注入からの経過時間100秒の条件において、0.4 mmのレール移動で本線上における折損事例と同形態の下首部の凝固割れが認められた。

4. 凝固割れ折損防止対策

再現試験結果から、モールドへの溶鋼注入後90～160秒の間にレール移動が生じた場合にテルミット溶接部に凝固割れが発生しやすいことが判明し、特に、本線上における折損事例と同形態の凝固割れが0.4 mm程度のレール移動でも発生することが確認された。これを基に、凝固割れ発生防止対策としてレール移動を抑制する方法について検討すると共に、施工後の凝固割れ検知方法について提案する。

4. 1 凝固割れ発生防止対策

本線上における溶接施工中のレール移動の主な原因は急激なレール温度低下に伴う軸力増加であると推定される。現在、ロングレール区間の施工現場では設定温度よりレール温度が低い場合、加熱法またはレール緊張器を用いた溶接施工が実施されている。加熱法はレールを熱膨張させて開先設定しているため、レール温度低下によるレール移動のリスクが高いと考えられる。一方、レール緊張器は油圧によりレールを拘束するため、レール温度低下によるレール移動のリスクは

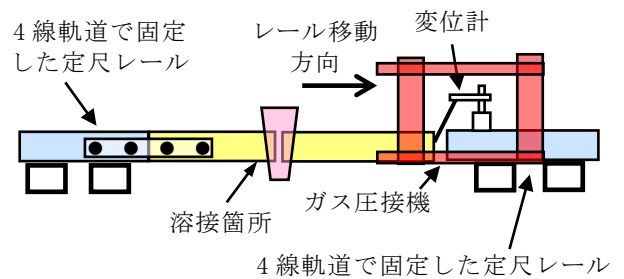


図4 凝固割れ再現試験概略図

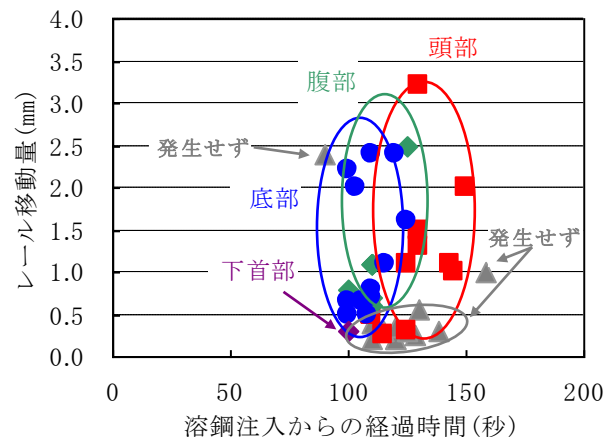


図5 凝固割れ再現試験結果

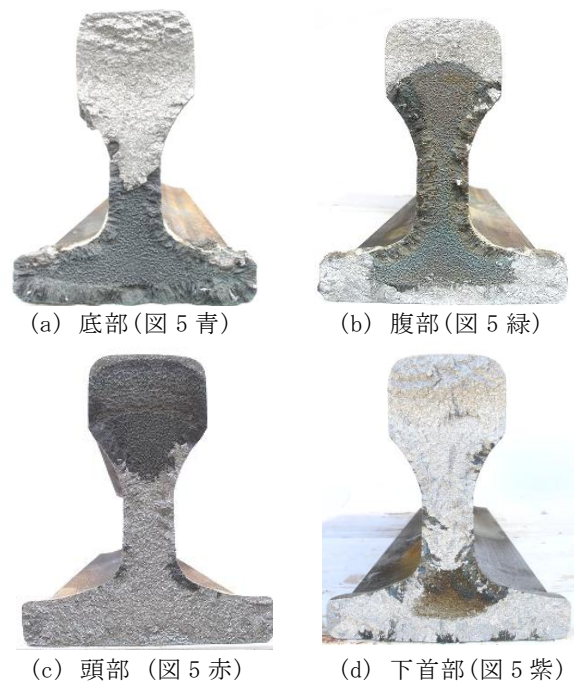


図6 再現試験体の代表的な破面例

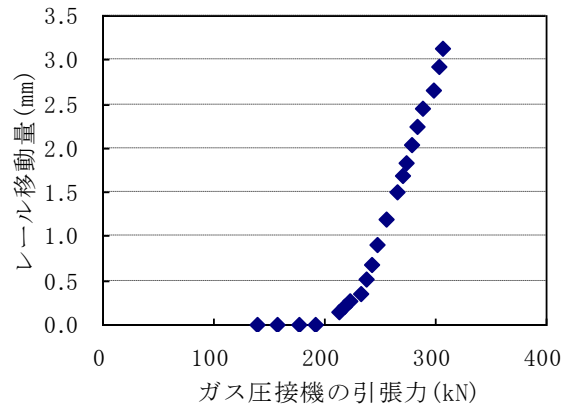
低い。したがって、凝固割れ発生率を減らす観点からレール緊張器を使用することが望ましい。

他方で、鉄道総研が把握している凝固割れによる折損事例のうち、約3割はレール緊張器を使用しているにも関わらず凝固割れが発生している。そこで、軸力増加時のレール緊張器の挙動を把握するため、レール緊張器によって拘束したレールをガス圧接機を用いて設定緊張力以上の力で強制的に引張り、レール移動量および緊張器の緊張力の変化を調査した。図7に、設定緊張力200kNにおける、引張力とレール移動量および引張力と緊張力の関係を示すが、設定緊張力以上の力でレールが引っ張られた場合、レール移動量が増加すると共にレール緊張器の指示緊張力も増加することが確認された。この結果より、レール緊張器の使用によってレールの移動を完全に防ぐことは難しいと判断されるが、指示緊張力の変化を確認することでレール移動を検知できる可能性がある。

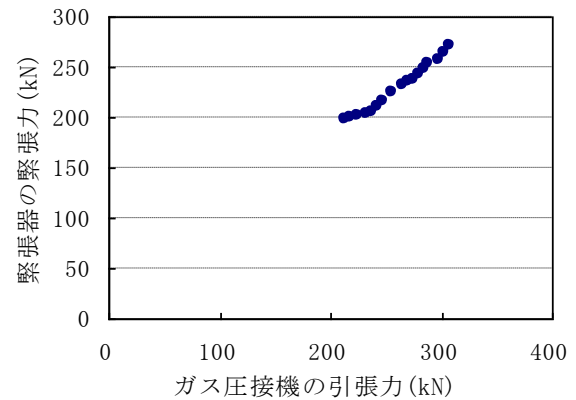
4. 2 凝固割れ検知方法

現在、テルミット溶接の施工中におけるレール移動の有無は、カスガイ尺により確認されている。今回の再現試験では、1.5mm以上のレール移動はカスガイ尺によって確実に検知できたが、1.5mm以下のレール移動の検知は困難であった。したがって、カスガイ尺でレール移動が確認されなかった場合でも、超音波探傷検査を確実に実施する必要があると判断される。

図8に再現試験で下首部および底部に凝固割れを発生させた試験溶接部(17本)の超音波探傷検査による欠陥等級の比率を示す。図8(a)は底部二探触子法(B2)による探傷結果、図8(b)は頭頂面からの一探触子法(H1)による下首部近傍の探傷結果である。図によると、底部二探触子法では7割強が3~4級の欠陥等級となり、頭頂面からの一探触子法では1本のみが3級となっている。図9に底部二探触子法による欠陥等級が3級および2級となった凝固割れ破面、表1にそれぞれの超音波探傷結果および曲げ破断荷重を示す。頭頂面からの一探触子法では、欠陥

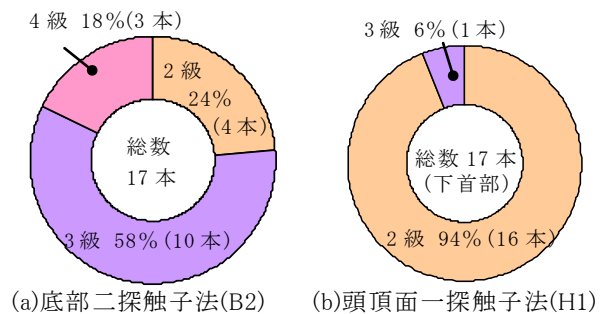


(a) 引張力とレール移動量の関係



(b) 引張力と緊張器の緊張力の関係

図7 レール移動量および緊張力と引張力の関係



(a)底部二探触子法(B2) (b)頭頂面一探触子法(H1)

図8 下首部および底部の凝固割れ溶接部における欠陥等級比率



(a) 下首部 (b) 腹部から底部

図9 試験溶接部の凝固割れ破面例

等級は同じ 2 級であるが、底部二探触子法では底部領域における凝固割れ発生面積に顕著な差があるにもかかわらず、発生面積の広い溶接部が 2 級と判定され、狭い溶接部が 3 級と判定された。過去の研究では底部開先面に発生する融合不良のような平面状の欠陥では、欠陥の面積と底部二探触子法で検出する反射エコー高さとの間に相関性があり、欠陥等級 2 級の溶接部は早期折損に至る可能性は低いと報告されている²⁾。しかしながら、凝固割れでは図 9(b)のように底部二探触子法で 2 級に判定された溶接部であっても、発生面積が広く、曲げ破断荷重が低い(200kN 程度)場合があるため、凝固割れに対しては欠陥等級 2~4 級の溶接部を不良と判定するべきであると考えられる。表 2 に凝固割れ検出の観点から提案する超音波探傷検査の判定基準を示す。なお、頭頂面からの一探触子法にて下首部付近に発生した凝固割れを欠陥等級 2 級で検出した場合、腹部領域として判定され、不良と判定されないことが想定される。そこで、頭頂面からの一探触子法における底部領域を図 10 に示すような範囲に拡大することも併せて提案する。

5. 折損防止対策のまとめ

本報告では、テルミット溶接部の凝固割れ発生条件および折損防止策について検討した。その結果、モールドへの溶鋼注入後 90~160 秒の間にレール移動が生じた場合にテルミット溶接部に凝固割れが発生しやすいことが判明し、特に、0.4 mm 程度のレール移動でも本線上における折損事例と同形態の凝固割れが発生することが確認された。以上を基に提案する凝固割れ折損防止対策は以下の通りである。

- (1) 僅かなレール移動でも凝固割れが発生する可能性があることから、溶鋼注入完了から 90~160 秒以内は作業を中断し、溶接部を確実に静置する。
- (2) テルミット溶接施工には必ずレール緊張器を使用し、緊張力を適宜確認する。万一、緊張力が増加した場合は、慎重に仕上がり検査を実施する。
- (3) 超音波探傷検査では、凝固割れ検出の観点から底部領域を拡大した後、底部二探触子法 2~4 級および頭頂面一探触子法（底部領域）2~4 級のきずエコーを不良判定とする。

参考文献

- 1) 須田征男, 長門彰, 徳岡研三, 三浦重: 新しい線路, 日本鉄道施設協会, pp. 96-99, 1990
- 2) 辰己光正, 上山且芳, 山本隆一, 工藤松一: レール溶融溶接部折損防止のための超音波探傷検査, 鉄道総研報告, Vol. 9, No. 12, pp. 43-48, 1995

表 1 超音波探傷結果および曲げ破断荷重

試験溶接部	欠陥等級		曲げ破断荷重 (kN)
	B2	H1	
図9(a)	3級	2級	408
図9(b)	2級	2級	225

表 2 提案する超音波判定基準

探傷方法	不良とする判定基準
底部二探触子法	2~4級
頭頂面一探触子法	2~4級(底部領域)

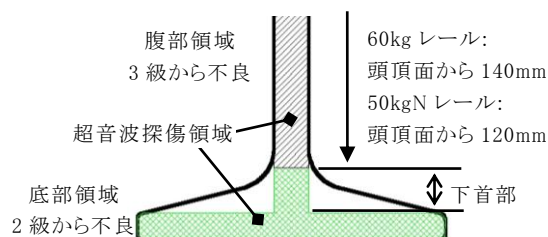


図 10 提案する超音波探傷判定領域