

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

伊藤 太初* 寺下 善弘* 辰己 光正*
山本 隆一* 設楽 英樹*

Initiation Condition and Preventive Measures for Center-line Shrinkage in Thermite Welds

Hajime ITO Yoshihiro TERASHITA Mitsumasa TATSUMI
Ryu-ichi YAMAMOTO Hideki SHITARA

The number of thermite weld failures has decreased due to improvement of ultrasonic inspection method, however a few number of thermite weld failures are still taking place in its early stage by center-line shrinkage. It is considered that center-line shrinkage is caused by the moving of rail to longitudinal direction just before its weld metal has been solidified, but the details of initiation mechanism are not yet clear. In this study, the simulative test of center-line shrinkage was conducted to find out the initiation mechanism, and then initiation condition and preventive measures of center-line shrinkage were discussed.

キーワード：レール，テルミット溶接，凝固割れ

1. はじめに

テルミット溶接法は酸化鉄とアルミニウムの酸化還元反応を利用した溶融溶接法である。この溶接法は、使用する機材が簡便で可搬性に富み、溶接時間が比較的に短いため、軌道上でのレール溶接に用いられる。特に、ロングレール区間における損傷レールの部分交換およびレール交換等の三次溶接に多用され、線路脇での二次溶接にも適用されている。

図1にはJRグループにおけるテルミット溶接の施工年度毎の折損件数、折損原因および施工数の推移を示す。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をはじめ種々の原因で折損が発生した。そのため、融合不良や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0～3件程度発生しており、その対策が求められている。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っ張られることで発生すると考えられている¹⁾が、詳細なメカニズムは明らかでない。本研究では凝固割れ再現試験を実施し、凝固割れ発生条件および折損防止策について検討を行った。

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一例を示す。凝固割れによる折損は、図2(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ある。破断の起点となった凝固割れは図2(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、稀に図3(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、凝固割れは図2(c)のように、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、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ことが明白である。

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っ張られる(移動)ことで溶接金属中心部に生じるものと考えられ、その発生原因から「引き割れ」と呼ばれることもある。また、諸外国では“Center-line Shrinkage”としてテルミット溶接部の損傷原因の主因となっている²⁾。なお、欠陥面積が比較的大きいことから、凝固割れを発生した溶接部の約

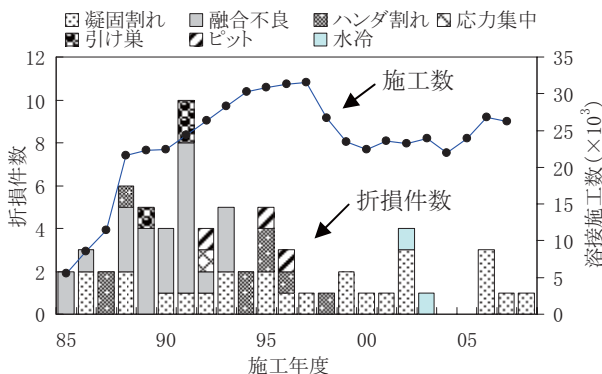


図1 テルミット溶接の施工数および原因別折損件数

* 軌道技術研究部 (レール溶接)

特集：軌道技術

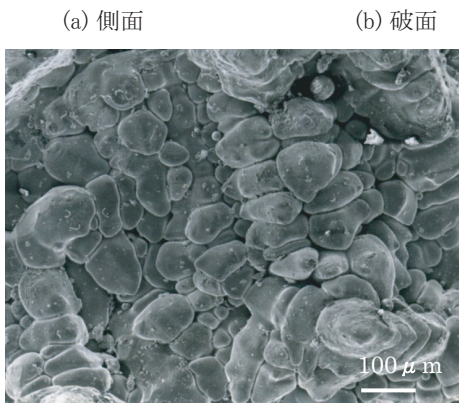
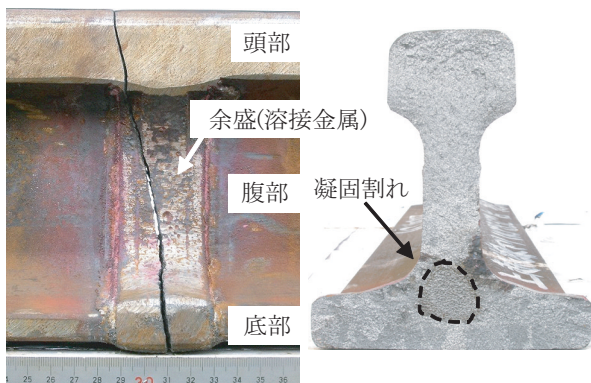


図2 凝固割れで折損した溶接部の一例

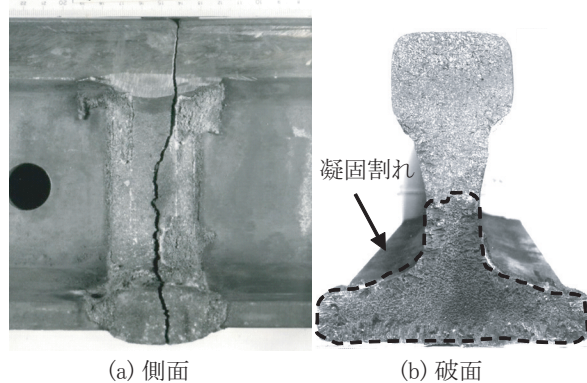


図3 底部全面の凝固割れで折損した溶接部の一例

8割が敷設から半年以内の早期で折損に至っている³⁾。

3. 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、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。

3.1 試験方法

図4に凝固割れ再現試験の概略図を示す。本試験は鉄道総研構内の試験軌道（四線軌道：長さ約60m）にて、50kgN普通レールを用いて実施した。図に示すように、溶接箇所を設置したモールド内にルツボからテルミット

溶鋼が注入された後、予め設定したタイミングで一方の被溶接レールを溶接箇所から外方に強制的に移動させることで凝固割れの再現を試みた。その際、試験溶接部一式が追従して移動しないよう他方の被溶接レールをまくらぎに締結されたレール（約25m）に継目板で固定した。表1に凝固割れ再現試験の条件を示す。レール移動方法として、ガス圧接機およびねじ式遊間調整器を移動用被溶接レールとまくらぎに締結されたレール（約25m）との間に設定して牽引した。レール移動のタイミングは溶鋼注入からの経過時間を指標とし、レール移動量の測定には移動側被溶接レール端部に設置したカンチレバー式変位計を用いた。再現試験終了後、試験溶接部に対して「レール溶接部の非破壊検査要領」⁴⁾に準拠した超音波探傷検査を実施すると共に、溶接部を曲げ破断し、破面上に出出させた凝固割れの発生位置および発生面積を調査した。なお、本再現試験では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も併せて行った。カスガイ尺によるレール移動の確認手順は次の通りである。

- (1) 芯出し後、溶接部を挟んだ両被溶接レールに一定長さのカスガイ尺を用いて印付けをする。
- (2) 溶接施工後、カスガイ尺を用いて印付け位置にズレが無い確認する（図5）。

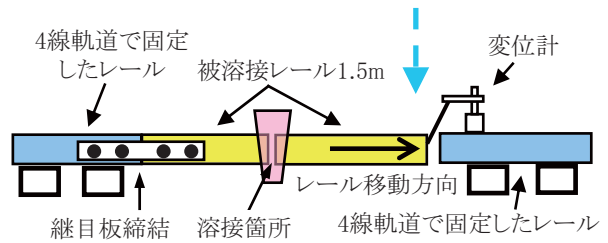


図4 凝固割れ再現試験概略図と予熱作業状況

表1 再現試験溶接部の作製条件

レール移動方法	溶鋼注入からの経過時間	レール移動量
ガス圧接機	90～160秒	0.1～3.2mm
遊間調整器	99～143秒	0.1～2.0mm

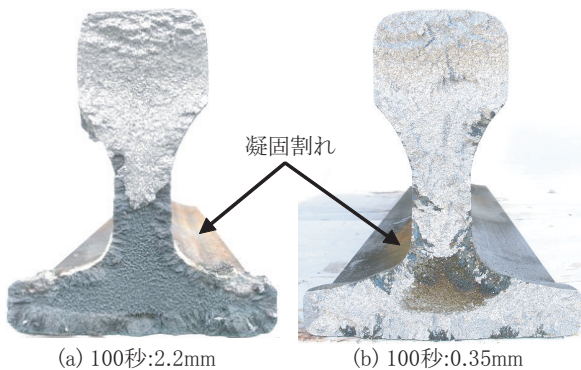


(a) レール移動の確認 (b) 印付け位置
図5 カスガイ尺によるレール移動の確認状況

3.2 再現試験結果

図6 (a) と (b) 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す。図中、黒く高温酸化した破面は凝固割れ破面であり、その周囲の金属光沢を呈す破面は曲げ試験時に破断した結晶状破面である。ここに示す破面例は、それぞれ図3 (b) および図2 (b) に示す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と類似している。図6 (a) に示す腹部から底部全面にかけて発生した凝固割れは溶鋼注入後100～120秒、レール移動量0.5～2.4mmの条件で作製した試験溶接部に多く観察され、図6 (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、レール移動量0.35mmの条件で作製した試験溶接部1本に認められた。図7に各試験条件と凝固割れ発生領域の関係を示す。これによると、凝固割れ発生領域はそれぞれ、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と共に底部から頭部へと発生領域が移動する傾向が認められる。また、溶鋼注入後90秒および160秒の試験溶接部では1mm以上レールが移動したにもかかわらず、凝固割れの発生が確認されなかった。これは、溶鋼注入後90秒では溶接金属中央部の何れの部位も未だ流動性のある溶鋼の状態であり、また溶鋼注入後160秒では何れの部位も凝固を完了し延性のある固体となるため、凝固割れが発生しなかったと推定される。

図8に、図7において青線で囲んだ領域の内、溶鋼注入後100～110秒、レール移動量1mm以下の試験条件で



(a) 100秒:2.2mm (b) 100秒:0.35mm
図6 再現した凝固割れ試験溶接部の破面例

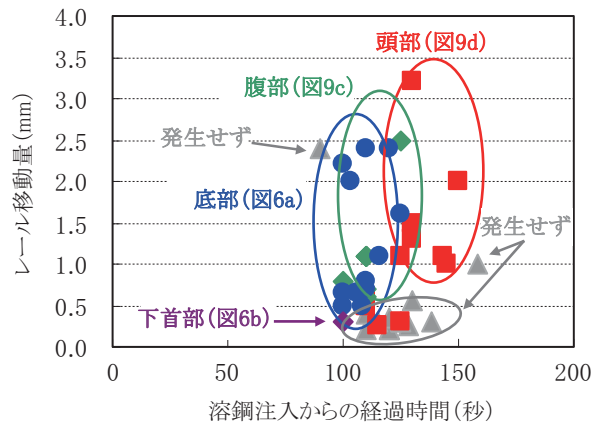


図7 経過時間およびレール移動量と発生領域の関係

発生させた凝固割れの発生面積とレール移動量との関係を示す。レール移動量が0.7mm以上の場合、全ての試験溶接部で $30 \times 10^2 \text{mm}^2$ （底部全面に相当する面積）以上の凝固割れが認められた。一方、レール移動量が0.4mm以下の場合、凝固割れが発生した試験溶接部は5本中1本のみであり、その凝固割れ発生領域は本線上で折損した溶接部の破面例と同じ形態の下首部内部のみであった。

以上、本試験の結果から、テルミット溶接部に凝固割れが発生する条件は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であり、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の凝固割れが発生した。さらに、レール移動のタイミングによっては僅か0.4mm程度のレール移動によっても凝固割れが生じることが判明した。

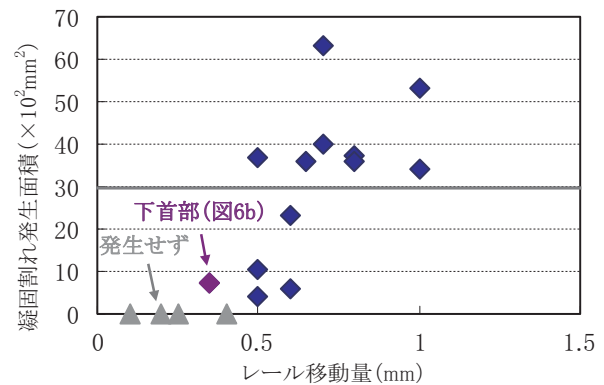


図8 凝固割れ面積とレール移動量の関係

4. 凝固割れ発生メカニズムに関する考察

凝固割れ再現試験の結果、本線上で折損に至った溶接部と同じ形態の凝固割れを再現したが、下首部の内部のみに凝固割れを発生させることが困難であることがわかった。そこで、推定されるテルミット溶鋼の凝固過程を基に、下首部内部のみに凝固割れが発生するメカニズムについて検討を行った。

図9に再現試験で凝固割れを発生させた溶接部の破面

特集：軌道技術

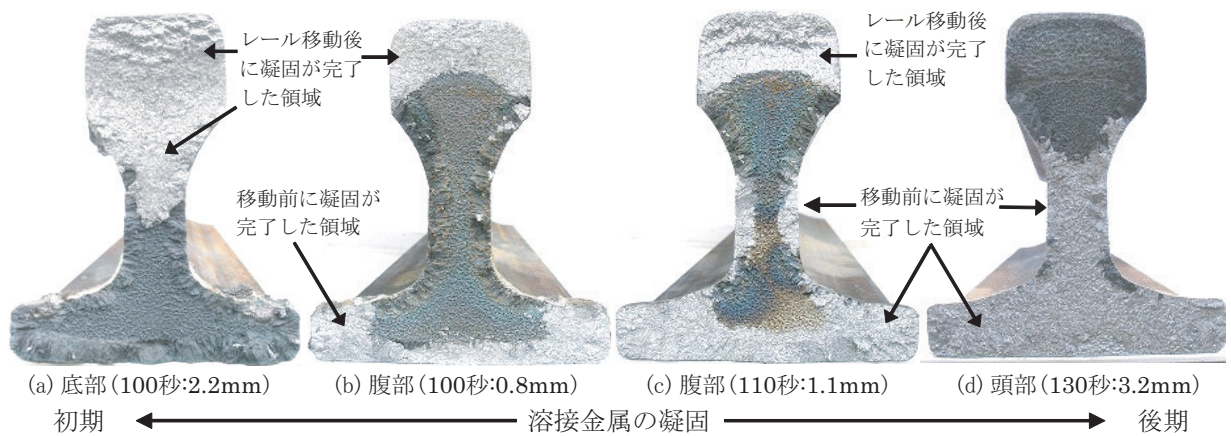


図9 破面から見た凝固割れ発生領域の推移

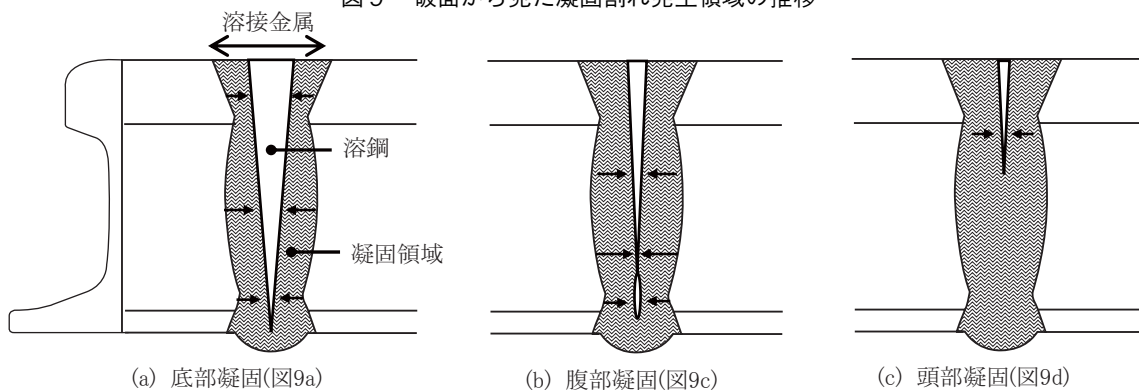


図10 レール縦断面から見た溶接金属凝固過程

例を溶鋼注入からの経過時間順で示す。上述の通り、凝固割れの発生領域は経過時間と共に底部から頭部へ推移する傾向が確認されるが、この凝固割れ発生領域の推移は凝固過程を反映しているものと推定される。また、この凝固過程を考慮すると結晶状破面の領域は、図中に示すように、レールが移動したタイミングでは既に凝固が完了していたと考えられる領域とレール移動後に凝固が完了したと考えられる領域に分類され、図9(c)に示す破面に着目すると、底部から凝固が進行する過程で、下首部の内部に比べ腹部表面の凝固が若干早いと推察される。以上の結果より、テルミット溶鋼の凝固過程は、底部端部から始まり、底面、腹部表面、腹部中央、下首部、頭部領域の順であると推定される。

図10にこれらの結果を基に推定されるテルミット溶鋼凝固過程をレール縦断面方向から見た模式図で示す。図10(a)に示す底部が凝固するタイミングでレール移動が発生した場合、移動量が1mmを超える場合は図9(a)に示すような腹部から底部全面に凝固割れが発生するが、0.4mm以下のレール移動の場合、これより上方に充填している溶鋼の押湯によって微小な隙間は埋められると推定される。つまり、このタイミングで微小なレール移動が発生しても凝固割れが発生する可能性は低い。これは図10(c)に示す頭部が凝固するタイミングにおいても同様であると考えられる。一方、図10(b)で示すよう

な下首部より先に腹部が凝固するタイミングでは、下首部内部の凝固時にはその上方からの溶鋼が届かないため0.4mm以下の微小なレール移動でも割れが発生する可能性がある。つまり、下首部内部の凝固割れはこのようなタイミングでレールが僅かに移動した結果発生していると考えられる。

以上の結果より、テルミット溶鋼の凝固過程において下首部内部の凝固が腹部に比べ遅いため、下首部内部が凝固する時にレールが移動した場合、0.4mm以下程度の微小な移動量でも割れが発生すると推定される。なお、上述の通り、下首部内部の凝固割れ発生条件とほぼ同じ条件で試験溶接部を複数作製したが凝固割れが発生した試験溶接部は1本のみであった。これは、腹部と下首部内部の凝固の時間差が短いためと推察される。

5. 凝固割れ折損防止策

再現試験結果より、テルミット溶鋼注入後100～110秒に0.4mm程度のレール移動が発生した場合、本線上の事例と同じ形態の下首部内部の凝固割れが発生する可能性が示唆された。

この結果から、凝固割れ発生防止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。

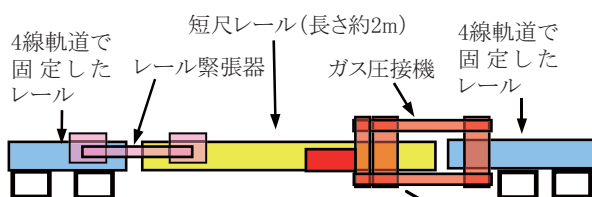
5.1 凝固割れ発生防止策

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て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は高いと考えられる。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内、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、レール緊張器使用時における軸力増加時の緊張器の挙動を再現する試験を実施した。図11に緊張器挙動再現試験の概略図を示す。本試験は凝固割れ再現試験と同様の試験軌道にて実施した。まくらぎに締結された2本のレール間に短尺レール（長さ約2m）を挿入し、一方はガス圧接機で固定し、他方はレール緊張器によって緊張力を負荷した。その後、短尺レールをガス圧接機によってレール緊張器の外方に引っ張ることで、レール温度低下に伴う軸力増加時の緊張器の挙動を再現した。図12 (a) に設定緊張力200kNにおけるガス圧接機による引張力とレール移動量を、図12 (b) にガス圧接機による引張力と緊張器の緊張力の関係を示す。本試験の結果、設定緊張力以上の力でレールが引っ張られた場合、レールが移動し、レール緊張器の緊張力は増加することが確認された。すなわち、緊張器の緊張力増加はレールの移動を示唆するものと考えられる。

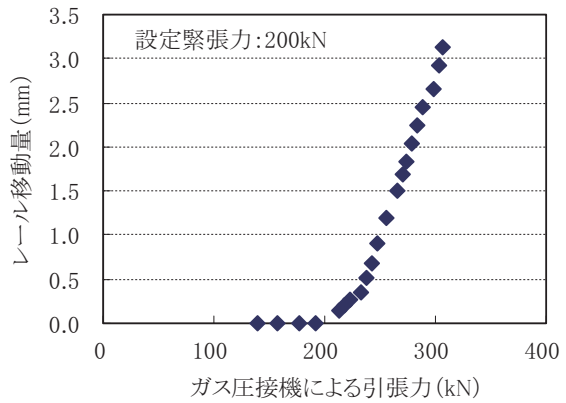
以上より、凝固割れ発生防止策として以下を提案する。

- (1) レールに軸力が発生する箇所の施工では、レール緊張器を使用する。
- (2) レール緊張器を使用してもレールが移動する可能性があるため、緊張力を適宜確認する。万一、緊張力が増加した場合はレールが移動している可能性が高いため、慎重に仕上がり検査を実施する必要がある。

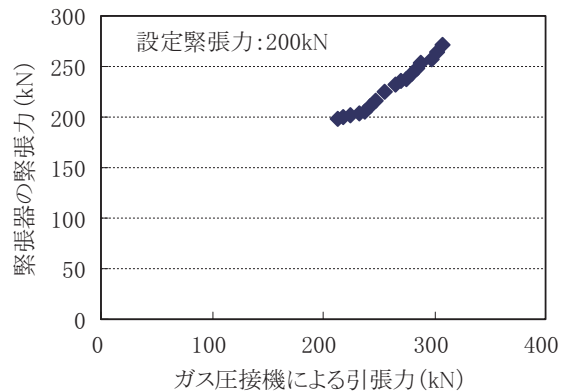


- ①ガス圧接機でレールをクランプ レール引張方向
- ②レール緊張器で緊張
- ③ガス圧接機で短尺レールを引っ張る

図11 緊張器挙動再現試験方法の概略図



(a) ガス圧接機による引張力とレール移動量の関係



(b) ガス圧接機による引張力と緊張器の緊張力の関係

図12 緊張器挙動再現試験結果

5.2 凝固割れ検知方法

現在、テルミット溶接の施工中にレール移動の有無を確認する方法として、上述したカスガイ尺による確認が実施されている。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することができたが、1.5mm以下のレール移動を検知することは困難であった。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13に再現試験で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13 (a) は底部二探触子法（B2）による結果、図13 (b) は頭頂面からの一探触子法（H1）により下首部近傍を探傷した結果である。底部二探触子法では、底部に凝固割れを発生させた溶接部の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14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と超音波探傷結果を示す。頭頂面からの一探触子法では、両者の最大エコー検出深さは異なるが、欠陥等級は同じ2級である。一方、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が、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。過去の研究結

特集：軌道技術

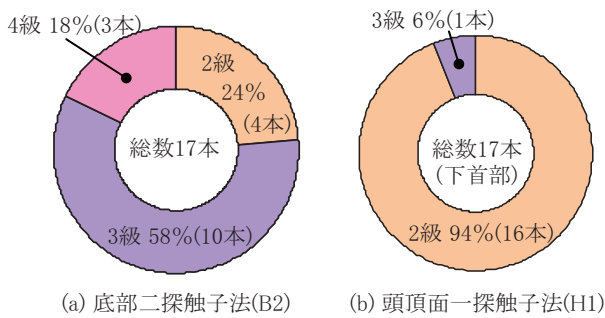


図13 底部凝固割れ溶接部の欠陥等級比率

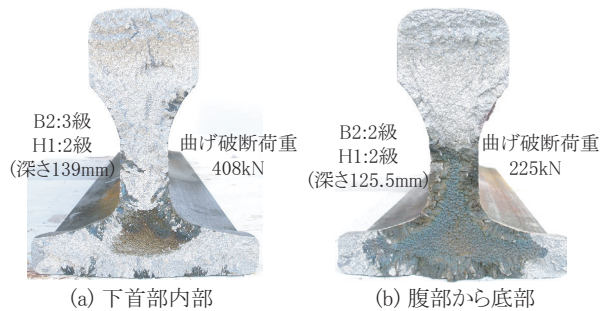


図14 試験溶接部の超音波探傷結果と凝固割れ破面例

果から、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ることが知られており⁵⁾、本試験の結果は従来とは異なる傾向であった。この理由は明確ではないが、凝固割れは細かい凹凸のある欠陥形態であり、凹凸の程度に差があるためと推察される。

また、過去の研究では底部融合不良による欠陥等級2級の溶接部は十分な強度を有すると報告されている⁵⁾が、凝固割れでは図14(b)のように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。そのため、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べきであると考えられる。

加えて、これまでの折損事例から、凝固割れが下首部付近に発生した場合、底部二探触子法の探傷領域から外れることもあると想定される。その場合は底部二探触子法のみでは検知し難いと考えられるため、頭頂面からの一探触子法により、下首部付近を慎重に探傷する必要がある。これまで、下首部は腹部領域の一部として、超音波探傷で3～4級の欠陥等級を不良と判定していたが、凝

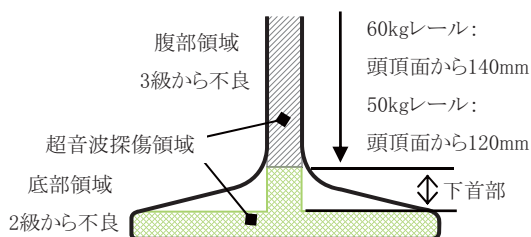


図15 提案する超音波探傷判定領域

固割れの発生を考慮し、底部領域を頭頂面下120mm以上(50kgNレール)および140mm以上(60kgレール)に拡大して2～4級を不良と判定することを提案する。

図15に、下首部に発生する凝固割れ検出の観点から提案する底部判定領域の変更案を示す。

6. 結論

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、テルミット溶接部に凝固割れが発生する条件は、モールドへの溶鋼注入後90秒～160秒の間にレール移動が生じた場合であり、特に溶鋼注入後100～110秒の場合は本線上で折損に至った溶接部と同じ形態の底部および下首部内部の凝固割れが発生した。さらに、レール移動のタイミングによっては僅か0.4mm程度のレール移動によっても凝固割れが生じることが判明した。

以上を基に提案する凝固割れ折損防止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級のきざエコーを不良判定とする。

謝辞

本試験実施にあたり、東日本旅客鉄道株式会社東京支社東京レールセンター稲毛派出の関係各位に多大なるご協力をいただいた。ここに記して感謝の意を表する。

文献

- 1) 辰巳光正：レール溶接技術，RRR，Vol.62，No.8，pp.18-21，2005
- 2) Graeme, O：BHP reacts quickly to a spate of weld failures, International Railway Journal, Vol.41, No.6, pp.2-15, 2001.
- 3) 寺下善弘：テルミット溶接部の折損状況と最近の折損事例，新線路，Vol.61，No.2，pp.24-26，2007
- 4) 例えば，東日本旅客鉄道(株)：レール溶接工事標準仕様書
- 5) 辰巳光正，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