

テルミット頭部補修溶接法を用いたレール補修方法

伊藤 太初* 梅内 一行** 寺下 善弘*
辰巳 光正* 山本 隆一*

Rail Repair Method by Thermite Head Repair Welding

Hajime ITO Kazuyuki UMENAI Yoshihiro TERASHITA
Mitsumasa TATSUMI Ryu-ichi YAMAMOTO

The thermite head repair welding is able to repair rail head defects, such as squats, and is conducted following almost the same procedure as the conventional thermite welding. Some examinations were conducted in order to apply the thermite head repair welding to JIS rails in this study. In the examination process, we developed a new preheating condition and a new pouring system for achieving the sufficient amount and uniformity in shape of the weld penetration. As the result of the evaluation tests, it was identified that the thermite head repair weld had adequate performance for practical use.

キーワード：テルミット溶接，補修溶接，レール頭部損傷

1. はじめに

近年、シェリングきず等のレール頭部損傷がレール折損の要因の一つとなっており、その管理に多大なコストが費やされている。このような損傷に対し、JR各社では定期的に超音波探傷検査を実施し、測定された水平裂長さや横裂深さにより対処方を決定している¹⁾。この際、ある閾値を超えたきずに対しては、継目板取り付け後に計画的あるいは緊急的にレール交換が実施されるが、このような損傷レールを交換する場合、2箇所のレール溶接施工が必須となるため、多くの手間と費用が必要となる。特に、ロングレール区間の施工では、レール緊張器を使用することや設定替えを伴うこともあり、更なる費用が必要となる。そのため、レール交換を必要としない補修方法が切望されている。

現在、国内では国鉄時代に開発されたガス溶射肉盛補修法が一部のJRおよび民鉄で適用されている²⁾。また、海外では古くから被覆アーク溶接法による頭部補修溶接が多くで実施されており、最近では炭酸ガスシールドアーク溶接等の半自動溶接法が採用されている³⁾。しかしながら、これらの方法はいずれも高度な技量を必要とし、また施工時間も要する。一方、近年、簡便な溶接法であるテルミット溶接法を利用した頭部補修溶接が注目されており、北米や欧州では試験敷設あるいは実用化に至っ

ている^{4) 5)}。そこで、本研究ではテルミット頭部補修溶接法を採用し、JISレールへの適用に向けた検討を実施した。

2. テルミット頭部補修溶接法の概要

図1にテルミット頭部補修溶接法の施工手順を示す。まず、シェリングきず等の損傷箇所（水平裂および横裂）をガス切断で切り取り、切断面をグラインダー研削した後、

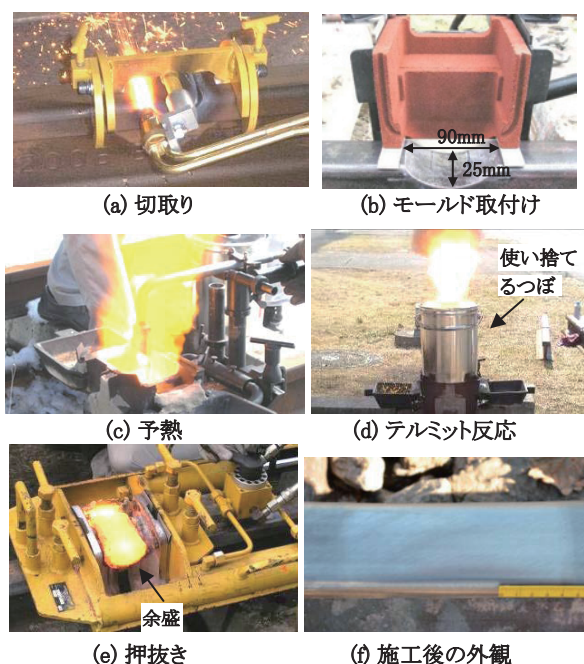


図1 テルミット頭部補修溶接法の施工手順

* 軌道技術研究部 レール溶接研究室

** 軌道技術研究部 レール溶接研究室（現 東日本旅客鉄道株式会社）

特集：軌道技術

浸透探傷検査で残存きずの有無を確認する。その後、モールドを設置し、予熱を実施する。当該溶接法では図1 (d) に示す使い捨てるつぼを使用し、モールド内に注入されたテルミット溶鋼が凝固した後に余盛を押抜き、グラインダーで研削仕上げする。このように、レールを完全に切断しないためにレール緊張器を必要とせず、通常のテルミット溶接1口の施工時間で損傷レールの補修が可能となる。施工コストは、レール交換および後日設定替えを実施する場合に比べ、5分の1程度に留まる試算である。

図2に、頭部補修溶接用の2分割モールドを内側から見た外観およびつぼから出鋼したテルミット溶鋼のモールド内での湯流れを模式的に示す。モールドは湯口側とライザー側の左右2分割であり、ライザー側にはライザー側へ通じるゲート穴が2箇所にはけられている。テルミット溶鋼の注湯経路は、プラグ上に出鋼した溶鋼が湯口からモールド内壁に沿って切り取り部に流れ込み、ゲート穴を通してライザー側へ抜ける一方の湯流れ(矢印)となっている。

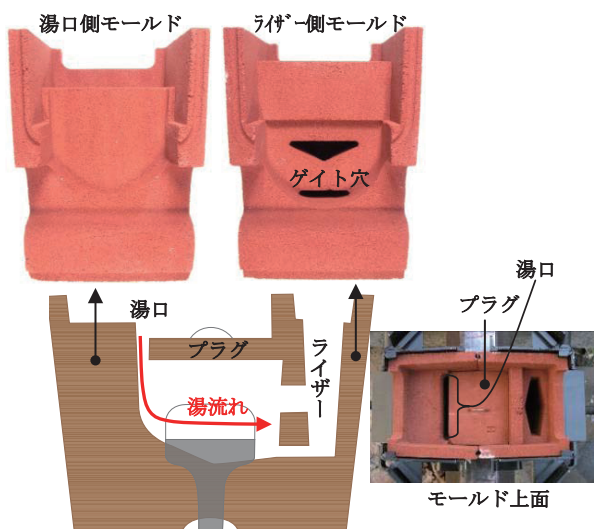


図2 モールドの外観および湯流れ模式図

3. JIS60kg レールへの適用試験

3.1 試験条件

テルミット頭部補修溶接部の欠陥発生傾向や溶込み状況等を確認するため、営業線から撤去された経年のJIS60kg 普通レールを用いて予備試験を実施した。切り取り形状は切り取り長さ90mm、深さ25mmの部分円状とし、その他の試験条件は溶接材料メーカーの推奨条件とした。最終仕上げ後の溶接部に対して、レール溶接部の非破壊検査要領に準拠した外観検査、浸透探傷検査、超音波探傷検査を実施すると共に、頭頂面のショア硬さを測定した。また、溶込み形状および溶込み量を把握するため、横断面および縦断面のマクロ組織を観察した。

3.2 試験結果

作製した試験体に対して実施した仕上がり検査では、いずれの試験体においてもきず指示模様およびきずエコーは検出されず、溶込み不良等の欠陥は認められなかった。

図3に補修溶接部の頭頂面で測定したショア硬さ分布の一例を示す。補修溶接に供したレールは経年の摩耗レールであるため、レール母材硬さはHS40～45の範囲に加工硬化している。一方、レール母材による希釈を受けない溶接金属中心部では新品レール並みの硬さ(HS37程度)を呈している。このような硬さ分布では、補修溶接後の列車通過によって、溶接金属部に溶込みが形成される可能性があり、好ましくないと判断される。

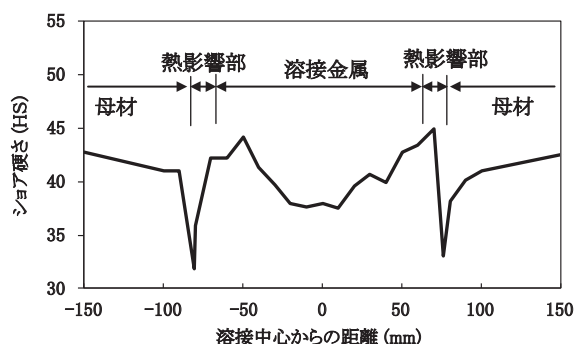


図3 頭頂面のショア硬さ分布例

図4に補修溶接部の断面マクロ組織観察位置およびその一例を示す。横断面は溶接金属の中心位置、縦断面は補修溶接部の右側半分のみで、レール軸中心からライザー側へ15mm離れた位置(横断面の矢印位置)で観察した。横断面マクロ組織では、溶込み量(切り取り境界と融合境界との差分)が湯口側で大きく、レール軸中心よりもライザー側では減少する不均一な分布となっており、特に軸中心から15mm程度離れた位置では最も

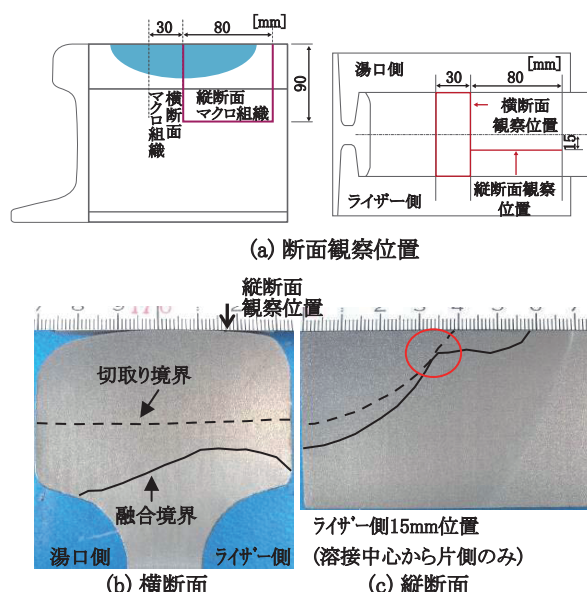


図4 断面マクロ組織観察位置およびその一例

小さくなっている。さらに、溶込みの少ないライザー側15mm位置で観察した縦断面マクロ組織では、切り中心から30mm程度離れた位置でほとんど溶込みが得られていない領域(図4(c)○部)が認められた。

これらの結果から、本研究では溶接金属の硬度および溶込み量の改善手法に関して検討することとした。

4. 溶接金属硬度および溶込み量改善手法の検討

4.1 溶接金属の硬度改善手法

押抜き直後の頭頂面温度が800℃程度であり、空冷処理により硬化が可能であることから、空冷範囲を比較的自由に設定できるガス圧接部の後熱処理作業等で使用されている冷却装置(九州鉄道機器製造(株)製RH-2-DHH)を用いた溶接金属の硬度改善手法を検討した。図5に、押抜き直後の溶接金属に対する強制空冷状況および空冷条件別のショア硬さ分布を示す。本空冷装置は、送風量をダイヤルで調整することが可能であり、送風量の異なる2条件(2.8m³/min:ダイヤル⑤, 2.2m³/min:ダイヤル③)を採用した。また、本空冷装置の吹出口は頭部幅で160mmの長さを有しているが、溶接中心部のみの硬度を上昇させるため、図5(b)に示すような遮蔽板を取り付け、吹出口を75mmに狭めて適用した。試験の結果、送風量2.8m³/minの条件では溶接中心部がHS48と顕著に硬化するが、送風量2.2m³/minの条件では、HS44と経年で加工硬化したレール母材と同等であり、ほぼ均一な硬度分布が得られた。

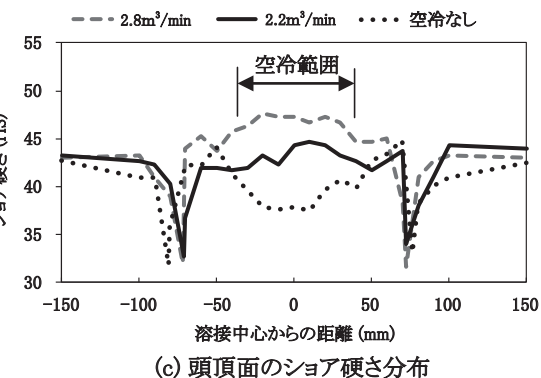
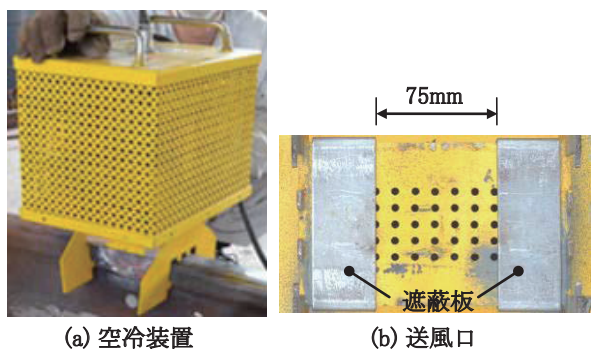


図5 空冷装置および空冷条件別のショア硬さ分布

4.2 溶込み量改善手法

4.2.1 予熱条件の変更

溶込み量を増大させる方法として、まず投入熱量の増加に着目し、予熱時間の延長を検討した。

図6に従来条件における予熱状況および予熱終了後のライザー側モールドを示す。当該溶接法では、予熱時にバーナが炎に覆われるため、予熱時間の延長に伴いバーナヘッドが赤熱(過熱)状態になり、逆火等による作業性の悪化や機器の損傷を招く可能性がある。また、予熱終了後のライザー側モールドを観察すると、下側ゲイト穴が溶融・拡大していることが判明した。つまり、ゲイト穴が小さいため、予熱炎がライザーへと適切に抜けていないものと考えられる。そこで、図7に示すようにゲイト穴を幅60mm、高さ20mmに拡大すると共に、予熱炎のガス圧力を下げ、火力を弱めた条件で予熱時間の延長を試みた。

提案する条件における予熱時のレール温度を確認するため、切り中心および中心から長手方向に22mm離れた位置において切り面下5mm位置に設置した熱電対で予熱時の温度を測定した。なお、比較のため従来条件でも温度測定を実施した。図8に温度測定の結果を示

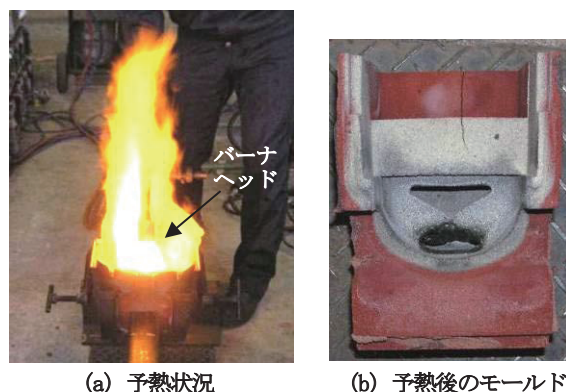


図6 従来条件における予熱状況

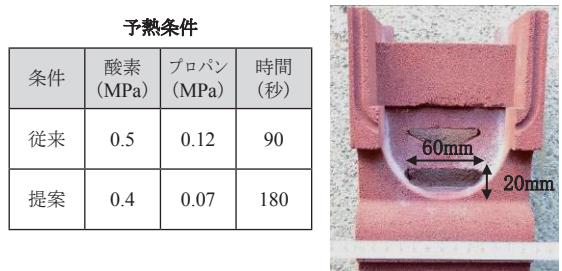


図7 予熱条件およびゲイト穴拡大状況

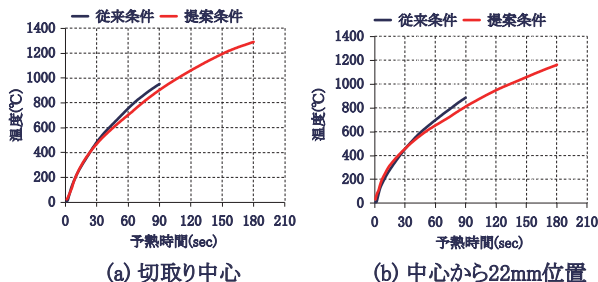


図8 各予熱条件における温度測定結果

特集：軌道技術

す。いずれの部位においても、予熱条件の違いによる昇温速度に大きな差はなく、溶接金属中心では90秒で約900℃、180秒で約1300℃に達している。また、提案条件では180秒の予熱時間でもバーナは過熱せず、逆火も生じていない。以上の結果から、提案条件を用いて試験体を作製し、溶込み状況を確認した。

図9に提案条件による試験体の断面マクロ組織を示す。予熱条件を除き、溶接条件は従来条件と同様である。いずれの断面においても入熱量の増加により、大きな溶込み量が得られている。また、従来条件でほとんど溶込みの得られなかったライザー側15mm位置における縦断面ではいずれの箇所においても3mm以上の十分な溶込み量を確保している。

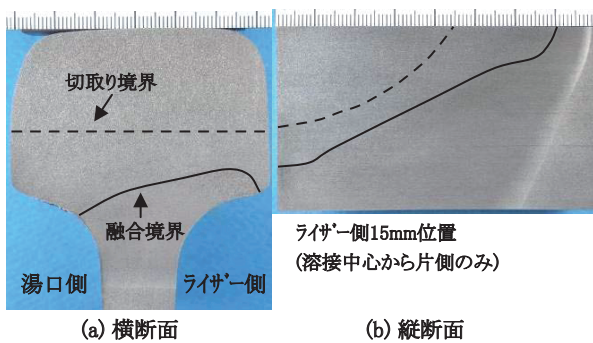


図9 提案条件による試験体の断面マクロ組織

4.2.2 湯流れ経路の変更

図2に示した通り、従来のモールドでは湯口からライザーへと抜ける一方向の湯流れとなる。そのため、流入したテルミット溶鋼が最初にレールに直撃する湯口側の切取り部で溶込みが大きく、熱量の奪われた溶鋼が流れるライザー側で溶込み量が少ない不均一な溶込み形状となっているものと推定される。さらに、従来モールドの湯流れ状況を水で模擬して観察した結果、図10に示すように、湯口側のモールド形状および切取り形状が部分円状となっているため、溶鋼が切取り中心に誘導されて流入していることが判明した。このため、中心から離れた領域には溶鋼が直撃せず、当該箇所の溶込み量が得られ難くなっていると判断される。以上を考慮し、溶込み

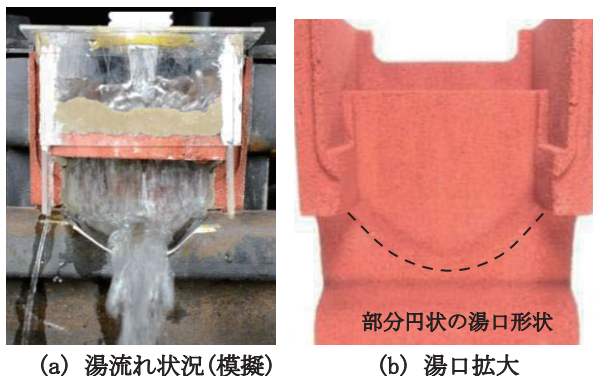


図10 従来モールドにおける湯流れ状況

形状の均一化を目的に湯流れの改善に関して検討した。

アーク溶接における母材の溶融現象では、入熱量が同一であっても、溶融金属の流れの方向によって溶込み形状が変化することが知られている^{6) 7)}。図11にアーク溶接における溶融金属の流れの方向と溶込み形状の関係を模式的に示す。図11(a)に示す溶融金属表面において外向き流が生じる場合、溶接面に対して平行方向の流れが主流となるため、溶接面周辺が溶融・浸食され、広く浅い溶込み形状となる。一方、図11(b)に示す溶融金属表面において内向き流が生じる場合、溶接面に対して直交方向の流れが主流となるため、溶接部底部が溶融・浸食され、深い溶込みが得られる。アーク溶接では溶融金属の表面張力が駆動力となり、流れの方向が決定されるが、当該溶接法では湯口を新たに設けることで、流れを制御することが可能であると考えた。

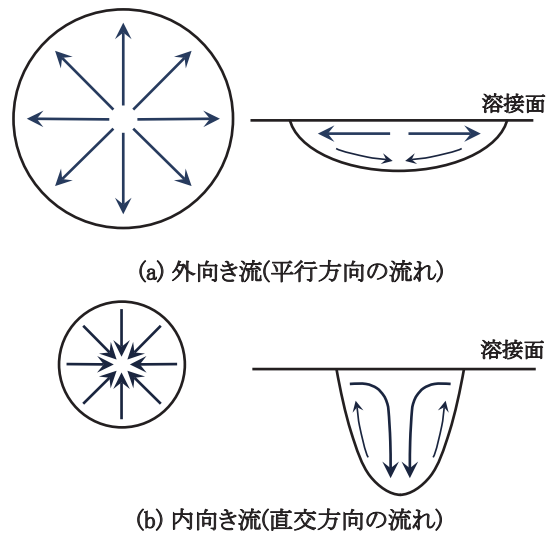


図11 溶融金属の流れの方向と溶込み形状の関係

図12に従来の湯流れに直交する湯流れを併用した注湯方式(以下、プラグ併用注湯と呼ぶ)を示す。従来の湯流れに加えてプラグに設けた貫通穴から注湯することで、溶込み量が不足する領域を改善することを目的とした。プラグに設けた貫通穴は、ライザー側15mm位置の切取り中心にφ6mm×1穴、中心から30mm位置にφ10mm×2穴とした。穴の総面積は約200mm²である。図13にプラグ併用注湯による試験体の断面マクロ組織を示す。湯流れ方式を改善したことにより、横断面にお

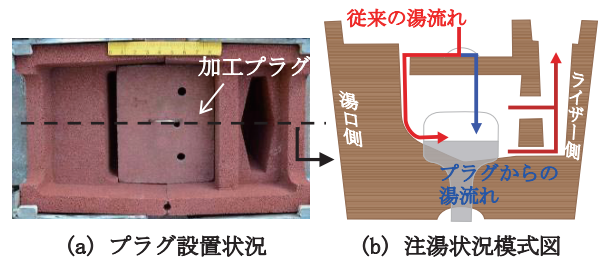


図12 プラグ併用注湯のプラグ状況および注湯状況模式図

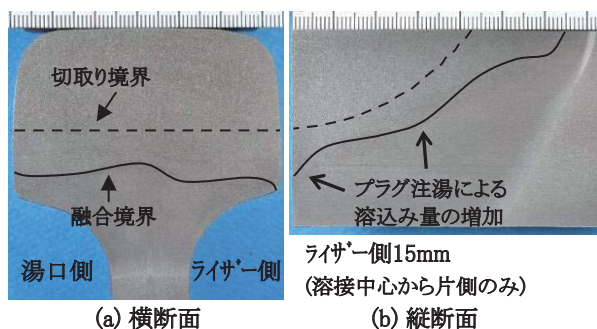


図 13 プラグ併用注湯試験体の断面マクロ組織

ける湯口側およびライザー側の溶込み形状が均一になると共に、縦断面の溶込み形状も均一化した。その結果、いずれの部位においても3mm以上の溶け込み量が確保された。

5. 仕上り検査方法および判定基準の提案

図 14 に溶接中心から 30mm 位置の横断面に発生した融合不良、図 15 に当該融合不良に対する超音波探傷検査結果を示す。この溶接部は本研究で提案した条件とは異なる条件で作製したもので、溶込み量の減少しやすいため溶接中心から 30mm 位置に融合不良が発生した。この融合不良に対して超音波探傷検査を実施した結果、頭頂面からの一探触子法で 3 級、頭部二探触子法で 2 級のきずエコーを検出した。一方、健全な溶接部でも、溶接金属内の偏析による介在物等から頭部二探触子法で 1 級程度の疑似エコーを検出す

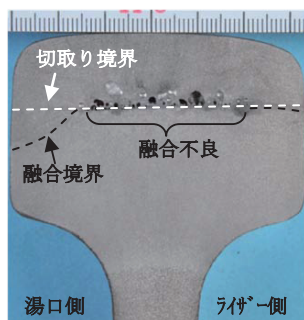
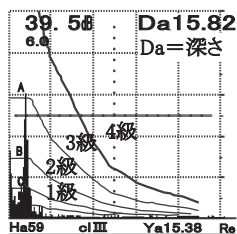
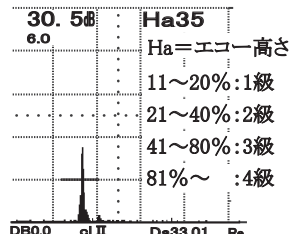


図 14 融合不良の一例

探傷方法	エコー高さ	欠陥等級	きず深さ
頭頂面一探触子法	59% (-12dB)	3 級	15.8mm
頭部二探触子法	35%	2 級	—



(a) 頭頂一探(3級)



(b) 頭部二探(2級)

図 15 融合不良に対する超音波探傷検査結果

る傾向が認められた。また、溶接範囲の広い当該溶接法では、通常のレール溶接部に比べ、探触子の走査範囲が広く、さらに融合境界部の形状が部分円状となることから、二探触子法のみで全断面を検査することは困難で

あった。そこで、これらの結果を基に、テルミット頭部補修溶接部の仕上り検査方法および判定基準を以下のように提案した。

- ① 欠陥の検出を目的として頭頂面からの一探触子法で溶接部全体を走査する。
- ② きずエコーを検出した場合、エコー反射源に対して頭部二探触子法を適用する。
- ③ 判定は頭部二探触子法で行い、欠陥等級 2～4 級を不良とする。

6. テルミット頭部補修溶接部の性能評価試験

テルミット頭部補修溶接部の性能を評価するため、(1) 曲げ破断試験 (頭部下向き)、(2) 頭頂面硬さ測定、(3) 転動疲労試験、(4) 軸力付加曲げ疲労試験、(5) ミクロ組織試験を実施した。

試験に供した試験体は、転動疲労試験を除き、図 7 に示す提案予熱条件 (ただし、プラグ併用注湯なし) で作製したものであり、転動疲労試験に供した試験体は従来条件で作製したものである。なお、いずれの試験体も新品の JIS60kg レールを用いており、頭部強制空冷処理を実施している。

6.1 曲げ破断試験

曲げ破断試験は 1m スパン中央集中荷重による 3 点曲げで実施した。試験本数は 3 体、破断姿勢は頭部の補修部を評価するため頭部下向き破断とした。表 1 に曲げ破断試験結果を示す。いずれの試験体もテルミット溶接部の破断荷重とたわみの基準値 (1,078kN-13mm) を上回っており、破断面に溶接欠陥は認められなかった。

表 1 曲げ破断試験結果

TPNo.	破断荷重(kN)	たわみ(mm)
1	1,256	14
2	1,396	20
3	1,390	19

6.2 転動疲労試験

図 16 に転動疲労試験の模式図および試験後の外観、表 2 に転動疲労試験条件および結果を示す。本試験では、曲げ支点から 50mm の位置が溶接金属中心となるように試験体を設置し、溶接金属中心から左右に 100mm、総移動範囲 200mm に亘って車輪を転動させた。垂直荷重は 150kN とし、車輪が自由端側にある時の頭頂面における最大引張応力は 70N/mm² となる。また、FEM 解析結果によると頭頂面下 10mm 位置における最大せん断応力は 139N/mm² であり、エンクローズアーク溶接部に対して実施された試験例では、頭頂部の 1 級未満の溶接欠陥から水平裂が発生する厳しい条件である。試験の結果、当該溶接部では 100 万回の往復転動回数において未破断であり、試験終了後の超音波探傷試験においても

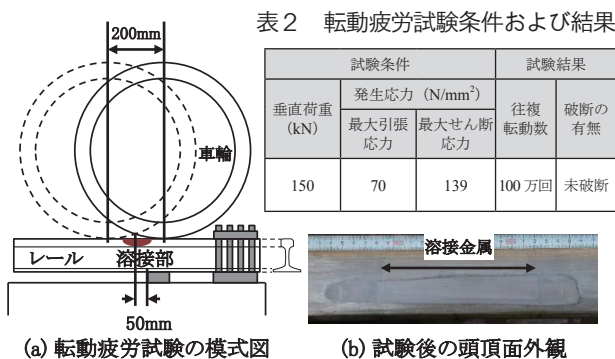


図16 転動疲労試験の模式図および試験後の頭頂面外観

きずエコーは検出されなかった。また図16(b)に示すように頭頂面の形態は良好であり、熱影響境界部に軽微な局部落込みが生じたものの、溶接金属部の摩耗状態は母材と同等であり、強制空冷による硬度改善効果が認められた。

6.3 軸力付加曲げ疲労試験

通常実施される曲げ疲労試験の場合、頭部領域には圧縮応力のみが作用するため、頭部領域の強度評価ができない。そこで、水平方向にレール軸力相当の引張応力を負荷した状態で支点間距離1m中央集中荷重による3点曲げ疲労試験を実施した。表3に試験条件および結果を示す。本試験条件で発生する応力は頭部領域で平均応力14N/mm²、全応力振幅178N/mm²、底部領域で平均応力211N/mm²、全応力振幅161N/mm²となり、頭部における最大のせん断応力は262N/mm²となる。過去にエンクローズアーク溶接部に対して同条件で軸力付加曲げ疲労試験を実施した結果、頭頂面下10mm位置に存在する欠陥等級3級の溶接欠陥から疲労き裂が発生・進展することが確認されている。当該溶接部で200万回の繰返し载荷を実施した結果、未破断であり、疲労き裂も認められなかった。

表3 軸力付加曲げ疲労試験条件および結果

試験条件					試験結果	
垂直	水平 (軸力)	レール頭部の発生応力 (N/mm ²)			繰返し数 (回)	破断の有無
		平均応力	全応力振幅	せん断応力		
20~275	908	14	178	262	2,000,000	未破断

6.4 ミクロ組織試験

図17に溶接金属中央部および熱影響境界部で観察したミクロ組織の一例を示す。溶接金属はレール母材に比べややフェライト分量の多いパーライト組織であり、普通レールのテルミット溶接部とほぼ同様の金属組織を呈している。また、熱影響境界部は一般的なレール溶接部と同様、細粒化したパーライト組織となっている。なお、いずれの部位においても、マルテンサイト等の異常硬化組織は認められない。

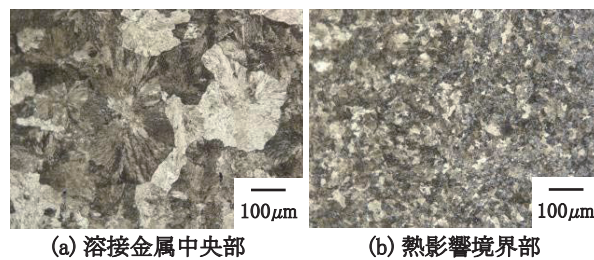


図17 補修溶接部におけるミクロ組織の一例

7. 結論

本研究で得られた主な結果は以下の通りである。

- (1) シェリングきずを対象としたレール頭部補修溶接法として、長さ90mm、深さ25mmの部分円状の範囲を補修可能なテルミット頭部補修溶接法を採用した。
- (2) 従来の溶接条件ではレールへの溶込みが不十分であったため、十分な溶込み量が得られ、溶込み形状が均一化される新たな予熱条件および注湯方式を提案した。
- (3) 溶接金属の中心部が低硬度となる頭頂面硬度分布を改善するため、頭部強制空冷による硬度改善手法を提案し、良好な硬度分布となることを確認した。
- (4) 頭部補修溶接部に対する仕上り検査方法として、超音波探傷検査（頭頂面からの一探触子法、頭部二探触子法）を適用し、頭部二探触子法で欠陥等級2～4級を不良と判定することを提案した。
- (5) 性能評価試験の結果、本研究により提案した施工条件で作製した頭部補修溶接部は十分な性能を有しており、実用に供しても問題ないと判断された。

文献

- 1) 寺下善弘, 設楽英樹: レール等に潜む損傷の検査法, RRR, Vol.65, No.5, pp.22-25, 2008
- 2) 石川和雄: レール端部ガス溶射肉盛り工法, 新線路, Vol.52, No.1, pp.8-11, 1998
- 3) Dahl, B., and Mogard, B. "Repair of rails on-site by welding," Svetsaren, Vol.50, No.2, pp.10-14, 1995.
- 4) Gutscher, D., "Evaluation of Railhead Repair Welding under Heavy Axle Loads," presented at the IHHA 10th international conference, New Delhi, India, February 4 - 6, 2013.
- 5) Gehrmann, R. and Keichel, J., "A simple approach to rail head repairs," Railway Gazette International, Vol.167, pp.42-43, 2011.
- 6) Heiple, C. R. and Roper, J. R., "Effect of Selenium on GTAW Fusion Zone Geometry," Welding Journal, Vol.60, p.143-s, 1981.
- 7) 平田好則: 溶接プロセスの基礎, 溶接工学夏期大学教材, 溶接学会, p.14, 2008