

2504 テルミット頭部補修溶接法の開発

正 [土] ○梅内 一行、伊藤 太初、寺下 善弘 (鉄道総研)

Development of Thermit Head Repair Welding Method

Kazuyuki UMENAI, Hajime ITOH, Yoshihiro TERASHITA

Railway Technical Research Institute, 2-8-38 Hikari-cho Kokubunji-shi, Tokyo

It needs a lot of operation time and enormous cost in the case of rail exchange due to rail damage, such as squat. Moreover, it takes more cost when restressing of continuous welded rail follows rail exchange. In this study, we examined the application of "Rail head repairing method with thermit welding", that is already applied as a repairing method of damaged rails in UK etc., to JIS 60kg rail. This paper reports the details of examination, and the performance of repaired part.

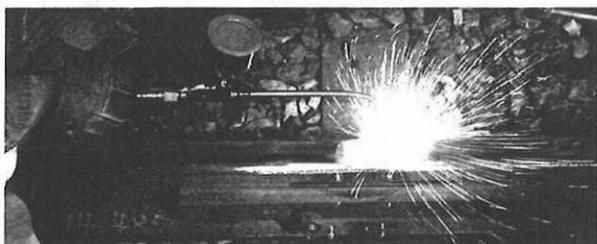
Keywords: Welding, Thermit Welding, Shelling, Thermit Head Repair Welding, THR

1. はじめに

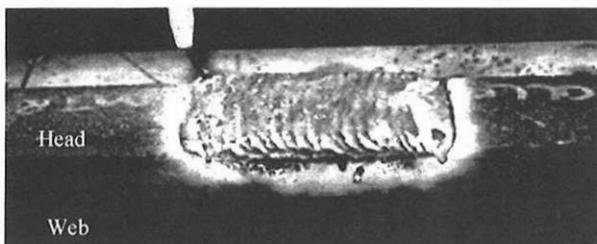
レール折損の主因となっているシェリング傷等の進展により、緊急的に損傷レール交換を行う場合、2箇所レールの溶接施工が必須となるため、多くの手間と費用が必要となる。特に、ロングレール区間での施工では、レール緊張器を使用したり、設定替えを伴う場合もあり、更なる費用がかさむ。本稿では、レール交換を必要としないテルミット溶接を用いたレール頭部補修溶接法について、これまでの開発状況を述べる。

2. レール損傷部に対する補修溶接の現状と溶接法の選定

現在、国内では図 1(a)に示すガス溶射肉盛法による頭部補修溶接が一部の JR および民鉄で適用されている¹⁾。国鉄時代には、被覆アーク溶接によるシェリング傷の補修溶接が試行されているが、シェリング傷の削り残しが起点となり、引張残留応力の作用によって、早期に疲労損傷を引き起こしたため、採用されていない。一方、海外では被覆ア



(a) Gas spray repair welding in Japan



(b) Shielded metal arc welding in overseas²⁾

Fig.1 Conventional rail head repair welding

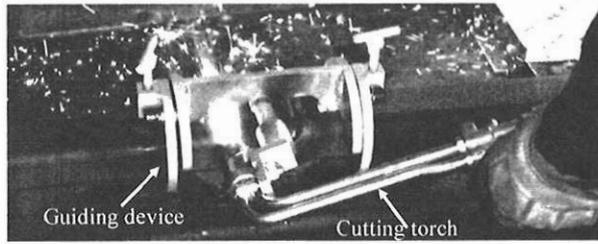
ーク溶接や図 1(b)に示すような炭酸ガスシールドアーク溶接等による半自動溶接が多くの国で採用されている。

アーク溶接は高度な溶接技量を必要とし、深さ 10mm 程度の補修溶接でも施工時間は長くなる。補修領域が浅い場合には、傷の削り残しや残留応力発生による損傷の危険性が高くなるため、アーク溶接での頭部補修溶接は得策ではないと判断される。一方、テルミット溶接による頭部補修溶接法は、テルミット溶接の施工経験があれば容易に施工可能である。本研究では、ゴールドサミット溶接材料の製造元であるドイツ ELEKTRO-THERMIT 社 (以下、ET 社) で試行中のテルミット頭部補修溶接法 (以下、THR) を導入し、JIS60kg レールへの適用試験を実施した。なお、THR は英国において既に約 3,500 口の施工実績がある。

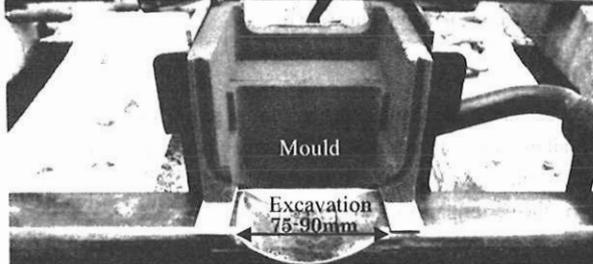
3. テルミット頭部補修溶接法の概要

図 2 に THR の施工手順を示す。THR はシェリング傷等によるレール頭頂部の損傷箇所 (水平裂および横裂) をガス切断で切り取り、テルミット溶接で補修する方法である。ガス切断面はグラインダ研削し、浸透探傷検査によって内部傷がないことを確認する。一般には使い捨てルツボが使用され、モールド内に注入された溶接金属が凝固した後に余肉を押抜き除去し、グラインダで研削仕上げされる。仕上り検査には、通常のテルミット溶接部と同様の方法が適用される。ET 社推奨の切取形状は長さ 75mm、深さ 25mm の部分円状である。本工法では、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修復が可能となる。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、わずか 5 分の 1 程度に留まる試算である。

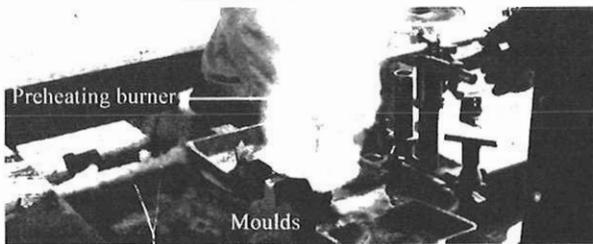
図 3 には、THR 用の 2 分割モールドとルツボから出鋼したテルミット溶鋼のモールド内での湯流れを模式的に示す。モールドは湯口側とライザー側の 2 分割であり、ライザー側にはゲイト穴が 2 箇所に設けられている。テルミット溶鋼の注湯経路は、プラグ上に出鋼した溶鋼が湯口からモールド内壁に沿って切取り部に流れ込み、ゲイト穴を通過してライザーへ流れる方式となっている。



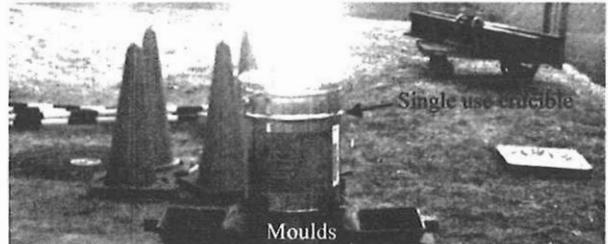
(a) Removal of rail head defect by gas cutting



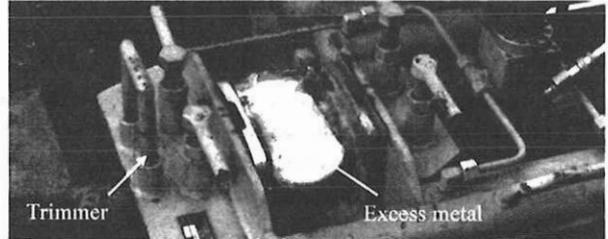
(b) Fitting and positioning a mould to rail on center of the excavation



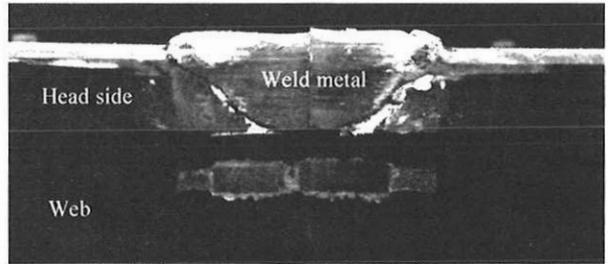
(c) Preheating



(d) Thermit reaction by single use crucible



(e) Removal of excess metal by the trimmer



(f) Weld appearance immediately after trimming

Fig.2 Welding procedure of THR

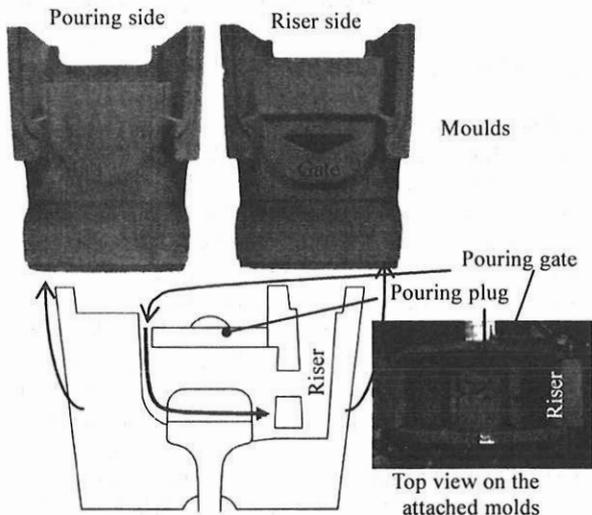


Fig.3 Schematic illustration of welding process in pouring

4. JIS60kg レールへの適用試験

4.1 切取り形状について

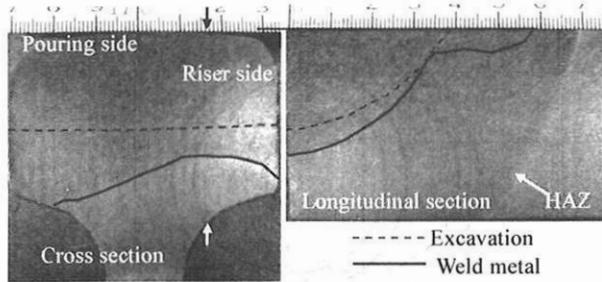
上述したように、ET社推奨の切取り形状は長さ75mm、深さ25mmである。日本では、シェリング傷による緊急的なレール交換を必要とする閾値を水平裂85mmとしている鉄道事業者があるため、ET社の推奨条件ではこれを除去することができない。このため、本研究では切取り長さ90mm、深さ25mmを標準として、検討を進めることとした。

4.2 予備試験

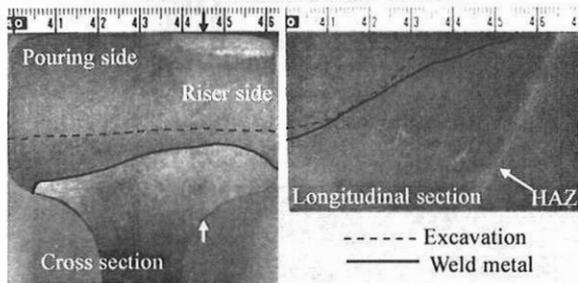
切取り長さの変更による補修溶接への影響を確認するため、予備試験を実施した。良否の判定は、超音波探傷試験におけるきずエコー検出の有無とともに、断面マクロ組織における溶接金属による溶込み形状の観察により行った。

切取り長さが15mm長くなっても、超音波探傷試験によって検出されるきずエコーはなく、溶込み不良等の欠陥は発生していないと判断される。図4に切取り長さ90mmと75mmの試験体で観察した断面マクロ組織の一例を示す。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ずれた位置(横断面の矢印位置)で観察した。横断面マクロ組織では、両条件ともに湯口側の溶込み量が大きい、レール軸中心よりもライザー側では減少し、軸中心から15mm程度離れた位置では最も小さくなっている。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は、大きな溶込みが得られるが、ライザー側へは熱量の奪われた溶鋼が流れるため、溶込みが減じるものと推定される。縦断面マクロ組織においては、切取り中心から15~35mm離れた位置では、ほとんど溶込みが得られていない領域も認められるが、切取り長さの影響ではないと考えられる。

図5にTHRによる補修溶接部の頭頂面で測定したショア硬さ分布を示す。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。



(a) The excavation length is 90mm



(b) The excavation length is 75mm

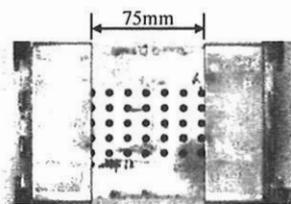
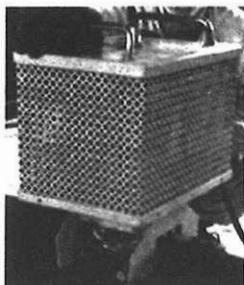
Fig.4 Macrostructure of THR

5. 溶接金属の硬度回復と溶込み量の均一化

予備試験の結果、THR を安心して導入するためには、溶接金属硬さの上昇および溶込み量の均一化が必要であると判断された。以下に、これらの検討結果を述べる。

5.1 溶接金属の硬度回復

溶接金属の硬度を上昇させる方法としては、使用するテルミット溶剤を高硬度の種別に変更すること、あるいは冷却速度の上昇による硬化処理の二つが挙げられる。ここでは、余肉押抜き直後の頭頂面温度が 800℃程度あることから、十分に冷却速度上昇による硬化処理が可能であると判断し、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㈱製 RH-2-DHH）による強制空冷試験を実施した。図 6 には、押抜き直後の溶接金属に対する空冷試験の実施状況を示す。本空冷装置は、ダイヤルで送風量を可変に調整できるため、溶接金属の硬さをレール母材硬さよりも若干高くなるダイヤル適正位置を選定した。図 7 には、ダイヤル⑤およびダイヤル③による硬さ分布を示す。なお、本空冷装置は頭部幅で長さ 150mm の加熱範囲を冷却するために 160mm 長さの吹出口を有しており、そのまま使用すると熱影響部の硬さが高くなり過ぎる傾向にある。このため、図 6(b)に示すように吹出口を 75mm に狭めて適用した。これによって、硬さの低い溶接金属中央部のみの硬度レベルを上昇でき、ダイヤル③（風量 2.2 m³/min）で、良好な硬さ分布が得られている。



(a) Setting of cooling device (b) Arrangement of outlet
Fig.6 Air-cooling device

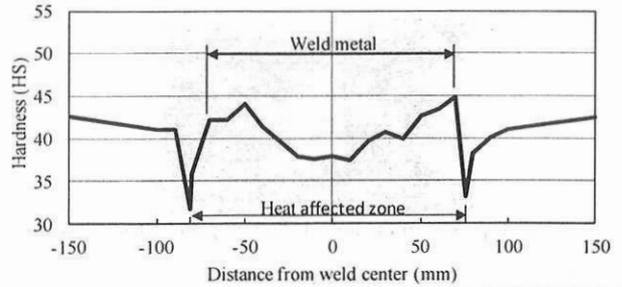


Fig.5 Hardness distribution at running surface of THR

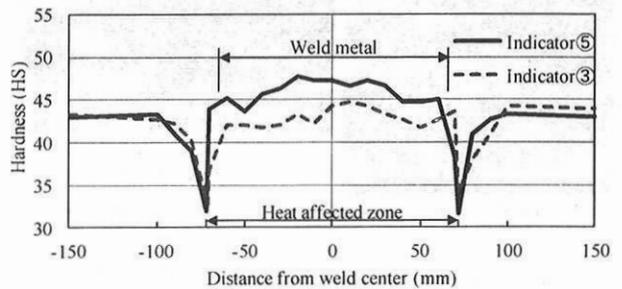


Fig.7 Hardness distribution at running surface of THR after air-cooling

5.2 溶込み量の均一化

溶込み量を均一化するためには、テルミット溶鋼注入時に切り取り部への直撃を避け、滑らかに溶鋼を流入させる必要があると考えた。このため、図 8 に示すように、湯口側モールドの内壁面をヤスリ等で研削加工し、切り取り部への入湯角度を浅くするとともに、切り取り部との接続部を台形に変更し（図中③）、切り取り中心から離れた部位にも注湯するようにした。また、ライザーにつながるゲイト穴を切り取り面と同じ高さまで上げ（図中④）、溶鋼の流れを妨げないようにした。

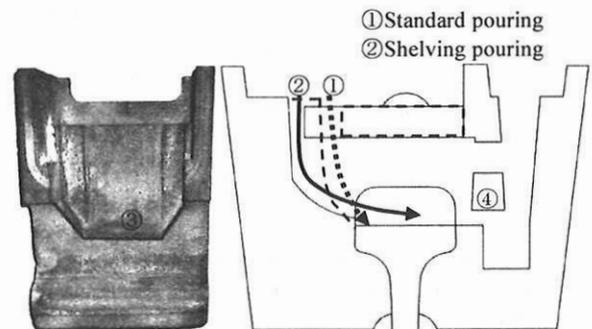


Fig.8 Schematic illustration of trial moulds

加工したモールドを使用し、合計 6 口の溶接試験を実施し、横断面と縦断面における溶込み形状を確認した。その結果、テルミット溶鋼による切り取り面への直撃を回避し、ライザー側への湯流れを良くしても、ライザー側および切り取り中心から 20~30mm 程度離れた部位の溶込み量を増大させることはできなかった。

この結果を踏まえ、通常の湯口からの注湯に加えて、プラグに設けた丸穴から注湯する方式（以下、「プラグ併用注湯」と呼ぶ。）を検討した。図 9 には、プラグ併用注湯におけるプラグの設置状況を示す。このように、溶込みの得にくいライザー側に、φ 15mm の丸穴を 2 箇所設置している。

図 10 に、プラグ併用注湯によって施工した THR の断面マクロ組織の一例を示す。横断面の観察位置は図 4 と同様、

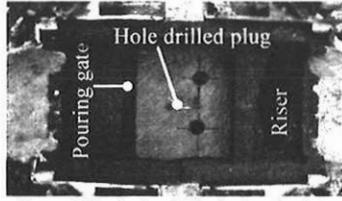


Fig.9 Top view of the hole drilled plug and attached molds

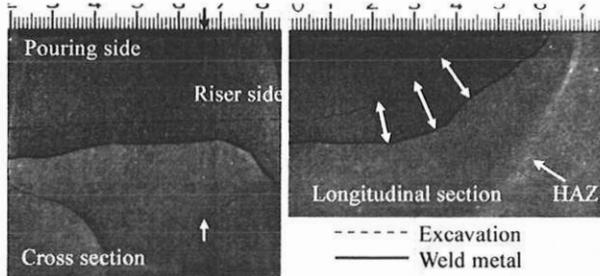


Fig.10 Macrostructure of THR with the hole drilled plug

溶接金属中心部であり、縦断面はレール軸中心からライザ一側 15mm 位置（横断面の矢印位置）である。溶接金属中心の横断面では、湯口側の溶込み量が減少しており、ライザ側の頭部側面での溶込みがやや大きく得られているものの、ほぼ均一な溶込み量となっている。また、縦断面マクロ組織では溶接金属中心部から 20~40mm 程度離れた位置での溶込みが大きく改善されていることが確認された（矢印部）。一方、溶接金属中央部では、溶込み量が 3mm 未満の領域があることから、プラグに開ける丸穴の大きさや位置等に、更なる検討を要す。

6. 補修溶接部の性能試験

THR を施工した補修レールの実用性能を確認するため、転動疲労試験および軸力付加曲げ疲労試験を実施した。これらの試験に供した試験体は、1.5m 長さで表 1 に示す条件で作製した。上述の強制空冷を行い、グラインダによる仕上げ研磨作業の後、浸透探傷試験および超音波探傷試験を実施した。補修溶接部には、湯口側頭部側面に $\phi 1\text{mm}$ の点状きずが観察されたものの、超音波探傷試験ではいずれのきずエコーも検出されなかった。なお、頭頂面における溶接金属の長さは 130mm、熱影響部を含む補修溶接部は 143mm と測定された。

Table 1 Welding condition for THR

	Excavation (mm)		Reaction time (sec)	Trimming start
	Length	Depth		
1	92.0	24.5	25	6'50"

Preheating condition :
Preheating time : 90sec Torch height : 140mm
Oxygen : 0.42MPa Propane : 0.12MPa

6.1 転動疲労試験

図 11 に転動疲労試験の概略図を示す。本試験では、曲げ支点から 50mm の位置が補修溶接金属中心となるよう試験体を設置し、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ときの頭頂面における最大引張応力は 70N/mm^2 となる。また、過去の解析結果によると頭頂面下 10mm 位置におけるせん断最大応力は 139N/mm^2 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、頭頂部に水平裂が発生する厳しい条件である。

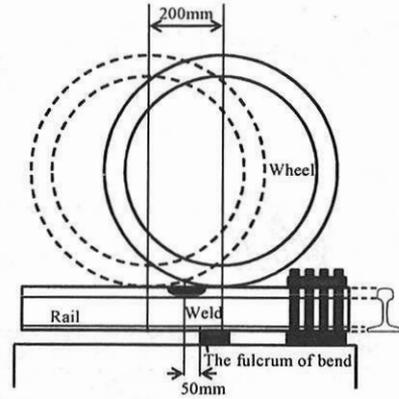


Fig.11 Schematic illustration of rolling contact fatigue testing

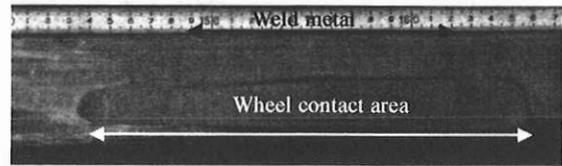


Fig.12 Running surface after rolling contact fatigue testing

THR による補修レールは、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きずエコーは検出されなかった。また、図 12 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ている。

6.2 軸力付加曲げ疲労試験

転動疲労試験を終えた試験体に対し、更に軸力付加曲げ疲労試験を実施した。本疲労試験は試験体を水平荷重 364kN（設定温度 -20°C 相当）で引張った状態で、支点間距離 1m の中央部に垂直荷重を載荷する 3 点曲げで実施した。垂直荷重範囲は 20~275kN で、底部に作用する全応力振幅は 161N/mm^2 である。一方、頭部には引張 31N/mm^2 から圧縮 167N/mm^2 の範囲の応力が作用する。補修レールは繰返し数 200 万回においても破断せず、試験終了後の超音波探傷試験では何れのきずエコーも検出されなかった。

7. まとめ

本稿では、レール折損の主因となっているシェリング傷をレール交換なしで除去可能なテルミット頭部補修溶接法の開発状況を報告した。補修溶接金属による溶込みの不均一は、プラグ注湯を併用することで改善できる見通しが得られたが、溶け込みが不足する領域もあり、今後も検討を継続する。また、補修溶接金属の硬さは、既存の強制空冷装置の吹出口を狭め、押抜き直後に強制空冷を実施することで適正に調整できることを確認した。一方、補修レールの強度特性には問題がないことから、早急に構内試験線等での施工試験を実施し、実軌道上での施工時の注意点を明らかにする予定である。

参考文献

- 1) 寺下善弘, 辰巳光正 : レールの継目落ちを改善する, RRR, Vol.69 No6, pp24-27, 2012
- 2) Jay Jaiswal : Repairing discreet defects, the rail engineer, No57, pp32-33, 2009